

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Linhas Elétricas Aéreas: Estudo do Movimento das  
Cadeias de Isoladores em Suspensão e  
Determinação dos Limites Técnicos para a sua  
Aplicação**

**Hugo Miguel Domingos Pedreira**

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Hélder Filipe Duarte Leite  
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Júlio Fores Pina

Junho de 2013



# Resumo

As linhas elétricas aéreas constituem um dos principais meios de transporte e distribuição de energia do Sistema Elétrico de Energia. Como tal, o seu planeamento deve ser pensado de forma bastante cuidadosa de forma a garantir, não só a qualidade de serviço para os clientes, mas também um serviço eficiente e sustentável a nível financeiro para o operador das linhas. Para garantir um transporte de energia correto ao longo das linhas, é necessário assegurar um correto isolamento ao longo da rede. O isolamento em redes elétricas aéreas é efetuado através de vários isoladores conectados, formando as denominadas cadeias de isoladores. Estas podem ser essencialmente de dois tipos, amarração ou suspensão. Visto as cadeias em suspensão serem mais económicas a utilização destas deve ser preferencial. Mas para que estas possam ser utilizadas é necessário estabelecer limites técnicos para a sua aplicação. Segundo prática corrente, a utilização de cadeias em suspensão em apoios de um cantão leva a que, quando ocorra uma modificação dos apoios do cantão, se um dos apoios adjacentes for de suspensão, este tenha de ser alterado, seja na armação ou até mesmo no apoio. Estas alterações acarretam custos, por isso é importante definir corretamente quais as situações em que estas alterações do apoio em suspensão não se revelam necessárias.

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo do movimento das cadeias de isoladores em suspensão de forma a poder determinar, de uma forma mais assertiva, as ocasiões em que é possível a aplicação destas. Numa primeira fase é analisada toda a legislação aplicável ao projeto de redes elétricas aéreas, nacional e internacional. Através da completa dedução das equações matemáticas, foi analisado o comportamento mecânico dos condutores em situações de patamar e declive e as forças presentes nos apoios quando estes não se encontram isolados, mas sim em vãos contínuos (cantão). A segunda fase deste trabalho consistiu em estudar o movimento das cadeias de isoladores em suspensão quando os apoios de um cantão, constituído por um apoio em suspensão, se encontram alinhados, seja nas situações de patamar ou declive, e também para quando o cantão possui uma estrutura em ângulo. Para a realização do estudo, foi elaborado um ficheiro Excel denominado “Movimento Cadeias de Isoladores” e um script em MatLab chamado “movimentoCI”, de forma a tornar mais eficiente a análise. Esta metodologia de cálculo tinha por objetivo estabelecer limites técnicos para a aplicação de cadeias de isoladores em suspensão. Foi alvo de estudo um caso prático específico onde foi procurado estudar os impactos técnico-económicos na alteração da estrutura do cantão.



# Abstract

*The overhead power transmission lines still constitute a major method of transportation and distribution of energy in the Electricity System. As such, the planning should be thought quite carefully to ensure not only the quality of service for customers, but also an efficient and financially sustainable service for the operator of the lines. To ensure the correct energy transport along the lines, it is necessary to guarantee a proper insulation throughout the network. The insulation on electrical carriers is done through various insulators connected to form the so-called insulators sets. These can essentially be of two types, tension insulator sets or suspension insulator sets. Since the insulator sets in suspension are more economic, the use of these should be preferred. So that they can be used is necessary to establish the technical limits for their application. According to current practice, the use of suspension insulator sets in a span leads to, when a change occurs in one of the supports of the equivalent span, if one of the adjacent insulator sets is a suspension sets, this has to be changed, either in a frame or even in the support. These changes involve costs, so it is important to correctly define the situations in which these changes in the suspension insulator sets are necessary.*

*This work aims to study the movement of the suspension insulator strings in order to be able to determine, in a more assertive way, the occasions in which it is possible to apply suspension insulator sets. Initially it was analyzed all legislation applicable to overhead power lines, national and international. Through the full deduction of mathematical equations, it was analyzed the mechanical behavior of conductor in situations of level and slope and the forces present in the support when they are not isolated, but in continuous spans. The second phase of this work was to study the motion of the suspension insulator when aligned, either in level or slope, or in angle. For this study, it was created an Excel file called "Movimento Cadeia de Isoladores" and a script in MatLab called "movimentoCI" in order to have a more efficient analysis. This calculation methodology aimed to establish technical limits to the application of suspension insulator sets. A specific case where the technical and economic impacts of changes in the structure of the line has been studied.*



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, o Professor Doutor Hélder Leite pela disponibilidade, pela confiança e incentivo, pelas críticas e pela paciência demonstradas ao longo do projeto. Sem o seu contributo a realização deste projeto não teria sido possível.

Gostaria também de deixar uma palavra de apreço e gratidão ao engenheiro Ricardo Pina pela disponibilidade demonstrada e pelos conselhos e sugestões que permitiram que este trabalho fosse concluído com sucesso.

Agradeço também aos meus colegas e amigos por todo apoio e motivação que me deram e que me permitiram chegar a esta fase.

Por fim, mas não menos importante uma palavra para a minha família, especialmente os meus pais, porque sempre me deram todo o apoio, suporte e incentivo para a conclusão deste trabalho e sem eles não estaria aqui hoje.

A todos, Obrigado.





# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras .....	xi
Lista de tabelas .....	xiii
Abreviaturas e Símbolos .....	xvi
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução.....	1
1.1 - Objetivos e Motivação da Dissertação.....	1
1.2 - Regulamentação Aplicável às Linhas Elétricas Aéreas .....	1
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	3
1.4 - Motivação Económica da Dissertação .....	3
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>5</b>
Análise do Comportamento Mecânico dos Condutores e Regulamentação Aplicável .....	5
2.1 - Trações Mecânicas Máximas.....	6
2.2 - Ações sobre as linhas.....	6
2.3 - Estados Atmosféricos.....	10
2.4 - Coeficientes de Sobrecarga .....	10
2.5 - Equação dos Estados .....	12
2.6 - Vão Crítico .....	12
2.7 - Estado Atmosférico mais Desfavorável.....	13
2.8 - Vão Equivalente .....	13
2.9 - Curvas Representativas do Comportamento da Curva Catenária nas Diferentes Situações .....	14
2.10 - Vãos Contínuos.....	19
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>25</b>
Movimento das Cadeias de Isoladores em Suspensão.....	25
3.1 - Tipos de Isoladores Utilizados em Redes Elétricas Aéreas.....	25
3.2 - Distâncias de Segurança entre Condutores e Outros Objetos .....	27
3.3 - Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores em Suspensão.....	30
3.4 - Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores em Suspensão .....	33
3.5 - Cantão com um apoio em suspensão em Patamar .....	40
3.6 - Cantão com um apoio em suspensão e em Declive .....	42
3.7 - Cantão com um apoio em suspensão e estrutura em Ângulo .....	47
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>54</b>
Impactos Técnicos e Económicos na Alteração Apoios de Suspensão para Amarração: Caso de Estudo .....	54
4.1 - Apoio .....	54

4.2 - Armação .....	56
4.3 - Cabo.....	56
4.4 - Isolador .....	57
4.5 - Impactos Técnicos e Económicos: Caso de estudo e Análise Crítica dos Resultados .....	58
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>71</b>
Principais Conclusões e Possíveis Trabalhos Futuros .....	71
5.1 - Conclusões .....	71
5.2 - Limitações da Metodologia de Cálculo Adotada.....	73
5.3 - Possíveis Progressos e Trabalhos Futuros.....	74
<b>Referências .....</b>	<b>75</b>
<b>Anexo A.....</b>	<b>77</b>
Dedução das Equações Relativas ao Cálculo Mecânico.....	77
Vão em Patamar .....	77
Vão em Declive .....	81
<b>Anexo B.....</b>	<b>86</b>
Dedução da Equação de Estados e Vão Equivalente .....	86
Equação dos Estados .....	86
Vão Crítico.....	87
Vão Equivalente .....	87
<b>Anexo C.....</b>	<b>89</b>
Movimento das Cadeias de Isoladores nas Situações de Cantão em Patamar .....	89
Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores em Suspensão .....	89
Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores em Suspensão .....	90
<b>Anexo D.....</b>	<b>96</b>
Movimento das Cadeias de Isoladores nas Situações de Cantão em Declive .....	96
Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores em Suspensão .....	96
Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores em Suspensão .....	108
<b>Anexo E.....</b>	<b>116</b>
Movimento das Cadeias de Isoladores nas Situações de Cantão em Ângulo .....	116
<b>Anexo F.....</b>	<b>119</b>
Correspondência de Variáveis do Word para MatLab .....	119

# Lista de figuras

Figura 2-1 - Condutor com manga de gelo, adaptada de [2].	11
Figura 2-2 - Árvore de decisão [2] [6] [7].	13
Figura 2-3 - Curva catenária representativa de um condutor num vão em patamar [16] [17].	15
Figura 2-4 - Curva representativa de um condutor num vão em declive [17].	16
Figura 2-5 - Ponto mais baixo da curva catenária.	17
Figura 2-6 - Cantão composto por um apoio em suspensão e em patamar, e vãos com o mesmo comprimento.	19
Figura 2-7 - Cantão composto por um apoio em suspensão e em patamar, e vãos com comprimentos desiguais.	20
Figura 2-8 - Cantão composto por um apoio em suspensão e em declive, e vãos com comprimentos desiguais.	22
Figura 2-9 - Situação Enforcamento	24
Figura 3-1 - Cadeia de isoladores em amarração [19].	26
Figura 3-2 - Cadeia de isoladores em suspensão [19].	27
Figura 3-3 - Desvio transversal provocado pelo de uma cadeia em suspensão.	31
Figura 3-4 - Fluxograma para o cálculo do desvio transversal	33
Figura 3-5 - Fluxograma para o cálculo do desvio longitudinal.	39
Figura 3-6 - Diferença de comprimento máxima entre vãos para a aplicação de cadeias em suspensão, com tolerância de movimento de 5% do comprimento da cadeia de isoladores.	41
Figura 3-7 - Diferença de comprimento máxima entre vãos para a aplicação de cadeias em suspensão, com tolerância de movimento de 10% do comprimento da cadeia de isoladores	42
Figura 3-8 - Situação possíveis de se verificar num cantão em declive.	43
Figura 3-9 - Cantão com um apoio em suspensão e estrutura em ângulo.	47
Figura 3-10 - Cantão com um apoio em suspensão e estrutura em ângulo, numa visão superior.	48
Figura 3-11 - Variação da direção da força resultante com a temperatura	51
Figura 3-12 - Fluxograma para o cálculo do deslocamento da cadeia de isoladores num cantão com estrutura em ângulo.	53

Figura 4-1 - Solicitações de um apoio. ....	55
Figura 4-2 - Armação tipo GAL [22].....	56
Figura 4-3 - Isolador Adotado [24]. ....	58
Figura 4-4 - Caso de estudo - Situação de alinhamento - Fase 1 .....	59
Figura 4-5 - Situação de ângulo, Fase 2 .....	64
Figura 4-6 - Deslocamento da cadeia de isoladores para diferentes temperaturas, em função do ângulo. ....	66
Figura 4-7 - Evolução da intensidade da solicitação principal conforme o ângulo entre as linhas. ....	68
Figura 4-8 - Aumento do preço do projeto em função de $\beta$ . ....	70
Figura A-1 - Vão em Patamar .....	77
Figura A-2 - Segmento do cabo.....	78
Figura A-3 - Vão em declive .....	81
Figura A-4 - Ponto mais baixo da catenária .....	84

# Lista de tabelas

Tabela 1-1 - Variantes da norma IEC50341-1 para cada país. ....	2
Tabela 2-1 – Pressão dinâmica do vento .....	8
Tabela 2-2 – Variação do coeficiente de forma conforme o diâmetro do condutor.....	9
Tabela 3-1 - Distancias de segurança .....	29
Tabela 3-2 - Resultados da análise do desvio transversal para um cantão em patamar com um apoio em suspensão .....	40
Tabela 4-1 - Características do cabo condutor .....	57
Tabela 4-2 - Características do cabo de guarda [23]. ....	57
Tabela 4-3 - Características do Isoladores [24]. ....	57
Tabela 4-4 - Resultados para a tração mecânica nos dois vãos, para as diferentes temperaturas.....	61
Tabela 4-5 - Tração resultante para as diversas temperaturas. ....	61
Tabela 4-6 - Deslocamento angular da cadeia de isoladores, nas diversas temperaturas. ....	62
Tabela 4-7 - Deslocamento da cadeia de isoladores para as diferentes temperaturas. ....	62
Tabela 4-8 - Solicitações no cabo de guarda.....	63
Tabela 4-9 - Esforços sobre o apoio B. ....	63
Tabela 4-10 - Variação da tração com a temperatura, no vão AB. ....	65
Tabela 4-11 - Variação da tração com a temperatura, no vão BC. ....	65
Tabela 4-12 - Tração resultante para as diferentes temperaturas.....	65
Tabela 4-13 - Deslocamento da cadeia de isoladores. ....	66
Tabela 4-14 - Deslocamento da cadeia de isoladores, para diversos valores de ângulo. ..	66
Tabela 4-15 - Resultados para o cabo de guarda, na situação de ângulo. ....	67
Tabela 4-16 - Esforços que o apoio tem de suportar na situação de alinhamento .....	67
Tabela 4-17 - Preço e quantidade para a situação de alinhamento .....	69
Tabela 4-18 - Preço e quantidade para a situação de ângulo.....	69
Tabela C-1 - Movimento Transversal na Situação de Patamar. ....	89

Tabela C-2 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 1.2 metros, e uma tolerância de movimento de 10% do seu comprimento. ....	90
Tabela C-3 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 0.6 metros, e uma tolerância de movimento de 10% do seu comprimento. ....	92
Tabela C-4 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 1.2 metros, e uma tolerância de movimento de 5% do seu comprimento. ....	93
Tabela C-5 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 0.6 metros, e uma tolerância de movimento de 5% do seu comprimento. ....	94
Tabela D-1 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação a). ....	97
Tabela D-2 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação b) ....	98
Tabela D-3 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação c) ....	100
Tabela D-4 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação d) ....	101
Tabela D-5 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação e) ....	102
Tabela D-6 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação f). ....	104
Tabela D-7 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação g). ....	105
Tabela D-8 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação h) ....	107
Tabela D-9 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação a).....	108
Tabela D-10 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação b).....	109
Tabela D-11 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação c).....	110
Tabela D-12 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação d).....	111
Tabela D-13 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação e).....	112
Tabela D-14 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação f) ....	113
Tabela D-15 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação g).....	114
Tabela D-16 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação h).....	115

Tabela E-1 - Movimento das cadeias de isoladores em suspensão num cantão com um apoio em suspensão e com estrutura em ângulo. ....	116
Tabela F-1 - Correspondência de variáveis entre Word e Matlab .....	119

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

CI	Cadeia de Isoladores
R.S.L.E.A.T	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
SEE	Sistema Elétrico de Energia



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 - Objetivos e Motivação da Dissertação

O trabalho realizado tem dois objetivos, num primeiro, identificar as consequências, a nível técnico como económico, do movimento das cadeias de isoladores em suspensão presentes nas redes de transporte e distribuição quando estas, devido a fatores como a variação de temperatura (que provoca variação da tração) e á força do vento, deslocam-se no espaço, bem como a influência do movimento destas no projeto e dimensionamento de apoios. O segundo objetivo é estabelecer limites técnicos para a aplicação de cadeias de isoladores em suspensão, sendo para isso necessário responder a três questões essenciais para o estudo de um projeto de redes de distribuição. São elas:

- Qual a diferença máxima de comprimento entre os vãos que se pode ter num cantão, para que seja possível a aplicação de cadeias de isoladores em suspensão?
- Qual o declive máximo que se pode ter num cantão para ser viável aplicar cadeias de isoladores em suspensão?
- Qual o ângulo máximo que se pode verificar num apoio de ângulo de forma a ser executável a aplicação de cadeias de isoladores em suspensão?

### 1.2 - Regulamentação Aplicável às Linhas Elétricas Aéreas

A resposta aos objetivos terá como base a norma europeia IEC50341-1 e o regulamento nacional Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T.). O primeiro regulamento é a norma europeia IEC50341-1 “Overhead electrical lines exceeding Ac 45kV Part 1: General requirements - Common specifications”. Esta foi concebida pelo comité

técnico CENELEC TC 11 e foi posteriormente aprovada pelo CENELEC em 2001-01-01. Aplicada apenas às linhas elétricas com tensão igual ou superior a 45 kV, esta descreve os pressupostos gerais para um correto funcionamento das redes e para a construção de novas redes. Esta norma é aplicada a todos os países pertencentes ao CENELEC, no qual se inclui Portugal. Para além deste documento, a norma IEC50341-1 possui também outros documentos, denominados NNA, que são preparados pelo próprio país e que têm por objetivo estabelecer critérios específicos ao país respetivo. Como se pode ver na próxima tabela, os NNA estão numerados da seguinte forma [1]:

Tabela 1-1 - Variantes da norma IEC50341-1 para cada país.

<b>Sigla</b>	<b>País</b>	<b>Norma</b>
AT	Austria	EN 50341-3-1
BE	Belgium	EN 50341-3-2
CH	Switzerland	EN 50341-3-3
DE	Germany	EN 50341-3-4
DK	Denmark	EN 50341-3-5
ES	Spain	EN 50341-3-6
FI	Finland	EN 50341-3-7
FR	France	EN 50341-3-8
GB	Great Britain	EN 50341-3-9
GR	Greece	EN 50341-3-10
IE	Ireland	EN 50341-3-11
IS	Iceland	EN 50341-3-12
IT	Italy	EN 50341-3-13
LU	Luxembourg	EN 50341-3-14
NL	Netherlands	EN 50341-3-15
NO	Norway	EN 50341-3-16
PT	Portugal	EN 50341-3-17
SE	Sweden	EN 50341-3-18
CZ	Czech Republic	EN 50341-3-19

O regulamento nacional é o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T.) elaborado pela Direção de Serviços de Energia Elétrica. Este regulamento tem vindo a ser substituído pelo anterior mas apesar disso ainda é muito usado na prática e concretamente pela EDP. Apesar de existirem pontos comuns aos dois, em poucos casos as recomendações/deliberações de um diferem do outro, embora o primeiro seja mais rígido do que o segundo no que toca a medidas de segurança.

### 1.3 - Estrutura da Dissertação

A dissertação é estruturada em cinco capítulos sendo o Capítulo 1 uma introdução ao problema de forma transmitir quais os objetivos do trabalho e o qual o interesse na sua realização. Neste, realiza-se uma síntese da regulamentação analisada para a dissertação e aplicável no estudo efetuado, bem como o impacto no orçamento de um projeto do movimento das cadeias de isoladores e da modificação dos apoios.

No segundo capítulo, são introduzidos conceitos teóricos e é realizada toda a dedução teórica das equações matemáticas relativas ao cálculo mecânico dos condutores. Esta dedução pretende demonstrar a origem de todas as fórmulas utilizadas no cálculo de flechas, trações de montagens, distância de condutores, entre outras. É realizado também o estudo do comportamento mecânico dos condutores em vãos contínuos nas situações de alinhamento (patamar e declive) e de ângulo.

O terceiro capítulo consiste, no estudo das distâncias de segurança reguladas pela norma IEC50341-1 e pelo Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T.). Realiza-se o estudo do movimento da cadeia de isoladores, segundo uma direção transversal e segunda uma direção longitudinal à linha. O cálculo destes desvios é ilustrado com um exemplo prático. As deslocções da cadeia de isoladores são analisadas para três tipos de cantão: cantão em patamar, cantão em declive e cantão em ângulo.

O capítulo quarto consiste num caso de estudo onde é alterada a localização de um apoio, e o objetivo é determinar e compreender os impactos técnicos e económicos desta alteração. O objetivo deste estudo é determinar, em função da nova localização dos apoios, a evolução do preço do projeto, bem como estabelecer limites para os quais é necessário proceder à substituição da armação como do apoio.

O quinto capítulo encerra a dissertação e é dedicado às conclusões retiradas com este trabalho. São também revistas as limitações da metodologia de cálculo e aos possíveis progressos e trabalhos futuros.

### 1.4 - Motivação Económica da Dissertação

Nos projetos de linhas aéreas existem dois tipos de suportes que são utilizados, amarração ou suspensão. O uso de cadeias em suspensão revela-se em muitos casos a opção mais económica, mas por razões de segurança estes nem sempre podem ser utilizados. Devido a este facto, uma correta definição dos limites técnicos para a aplicação destes pode levar a uma diminuição do orçamento do projeto.

Nas redes de distribuição, é necessário proceder a alterações na localização dos apoios de um cantão. Estas modificações levam a que, os apoios que se encontram em suspensão, sejam substituídos, seja na sua armação ou na sua estrutura completa, incluindo o apoio. Estas

alterações são dispendiosas e nem sempre necessárias. Como tal, o estudo realizado no capítulo 4 permite compreender os impactos que estas alterações provocam ao nível dos esforços sobre os apoios e sobre a cadeia de isoladores de forma a definir quais os constituintes dos apoios que devem ser substituídos.

## Capítulo 2

# Análise do Comportamento Mecânico dos Condutores e Regulamentação Aplicável

O cálculo mecânico de linhas elétricas aéreas é realizado com o objetivo de garantir que todos os equipamentos da rede, tais como isoladores, postes, cabos, entre outros conseguem suportar os esforços mecânicos a que vão ser sujeitos. Estas são afetadas por diversos fatores atmosféricos, tais como a temperatura, o vento e a formação de gelo. O cálculo mecânico tem então como principais objetivos os seguintes pontos [2]:

1. Determinação da tensão de montagem dos condutores. Esta tensão é calculada tendo em conta as condições atmosféricas que se verifiquem no momento da colocação mas deve também ser assegurado que não acontecem situações de rutura dos condutores independentemente das condições atmosféricas que se possam vir a verificar;
2. Determinação das alturas dos postes de forma a serem verificadas as distâncias mínimas obrigatórias entre condutores e objetos próximos da linha (como por exemplo: árvores, casas,...) segundo o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T);
3. Cálculo do afastamento necessário entre condutores, ao longo de toda a linha, de forma a garantir que todos os pressupostos presentes no Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão são cumpridos;
4. Dimensionamento dos apoios bem como verificação da estabilidade dos maciços de fundação, de forma a cumprir as recomendações para linhas aéreas de Alta Tensão até 30 kV da Direção Geral de Energia;

Neste capítulo irão ser analisadas todos os aspetos relativos ao cálculo mecânico de linhas aéreas. Numa primeira fase irão ser introduzidos alguns conceitos teóricos bem como uma análise de legislação aplicável. As equações relativas ao comportamento da curva catenárias serão deduzidas para as situações de patamar e de declive. São também estudadas as

forças/solicitações presentes num cantão composto por 3 apoios, sendo um dos apoios em suspensão.

## 2.1 - Trações Mecânicas Máximas

As trações mecânicas máximas, correspondem às trações que os condutores devem aguentar sem que ocorra o risco de rutura, quando estão sujeitos às condições atmosféricas mais desfavoráveis. Segundo a Norma IEC50341-3-17 (pág. 35), o projeto da linha deve garantir que a tração máxima admissível nos condutores não ultrapasse os 40% da tração de rutura dos mesmos. O limite de tração máxima a que os condutores podem estar sujeitos sem ocorrer risco de rutura é:

$$t_{seg} = \frac{T_R}{2,5 \times \sigma} \text{ [daN/mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 2.1})$$

Onde:

$t_{seg}$  - Tração de segurança em daN/mm<sup>2</sup>;

$T_R$  - Tração de rutura em daN;

$\sigma$  - Secção do condutor em mm<sup>2</sup>.

## 2.2 - Ações sobre as linhas

As ações sobre as linhas são classificadas da seguinte forma [1]:

Segundo a sua duração:

- Ações Permanentes - Forças horizontais provocadas pelas trações máximas a que os condutores estão sujeitos, e forças verticais provocadas pelo peso do mesmo;
- Ações Variáveis - Forças provocadas pelo vento, gelo e variação de temperatura;
- Ações Acidentais - Estão relacionadas com o aspeto da segurança das estruturas que pode ser afetado por, por exemplo avalanches;

Segundo a sua resposta estrutural:

- Ações Estáticas - Não causam aceleração dos constituintes das linhas;
- Ações Dinâmicas - Causam uma aceleração significativa nos componentes das linhas.

### 2.2.1 Ação do vento sobre as Linhas

A ação do vento sobre as linhas provoca o aparecimento de novas forças sobre os diversos componentes das linhas. Estas forças dependem proporcionalmente da velocidade do vento e consideram-se que atuam numa direção horizontal e a força originária da sua ação considera-se paralela a essa direção. Segundo a Norma IEC50341-3-17 (pág. 7), o território Português está dividido em duas zonas de vento distintas:

- Zona A - Corresponde à totalidade do território Português, com a exceção das regiões incluídas na Zona B;
- Zona B - Corresponde às Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira e às regiões continentais situados no interior de uma faixa de 5 km de largura ao longo da costa ou em altitudes acima de 600 metros

#### Velocidade do vento

Conforme está definido na Norma IEC50341-1 (pág. 48), vão ser agora definidos aos diferentes tipos de velocidade do vento:

- Velocidade média do vento,  $V_{média}$  - Corresponde a velocidade média vento em m/s ao longo de um período de 10 minutos a uma altura de 10 metros acima do solo em terreno relativamente aberto;
- Velocidade do vento de rajada,  $V_g$  - Valor máximo característico da turbulência momentânea do vento, com base na velocidade média do vento num período de 2 segundos. A relação entre a velocidade do vento de rajada e a velocidade média é dada pela seguinte equação:

$$V_g = k_g \times V_{média} \text{ [m/s]} \quad (\text{eq. 2.2})$$

Onde:

$V_g$  - Velocidade do vento de rajada [m/s];

$k_g$  - Factor de velocidade do vento de rajada de valor de 1,5;

$V_{média}$  - Velocidade média do vento [m/s];

- Velocidade do vento de referencia,  $V_r$  - Velocidade do vento, em [m/s], a ter em conta 10 metros acima do chão no local em questão;
- Velocidade do vento a uma altura arbitrária h acima do solo,  $V_h$  - Segundo a cláusula 4.2.2.1.6, da Norma IEC50341-3-17, quando a linha se encontra a uma altura inferior a 20 metros, a velocidade do vento é considerada constante:

$$V_h = 1,585 * V_r \text{ [m/s]} \quad (\text{eq. 2.3})$$

Quando a altura for superior a 20 metros deve ser aplicada a seguinte lei exponencial, independentemente do tipo de terreno:

$$V_h = V_r \times \left(\frac{h}{10}\right)^{0.2} \text{ [m/s]} \quad (\text{eq. 2.4})$$

Esta equação é válida apenas para alturas até 100 metros. Para alturas superiores, ou me terrenos de especial relevo, é necessário proceder a uma avaliação específica.

#### Pressão dinâmica do vento

Segundo a Clausula 4.2.2.2 da Norma IEC50341-3-17, a pressão dinâmica do vento é dada pelas seguintes equações [3]:

- Zona A

$$q_h = 0.5 \times \rho \times 30^2 \times (h/10)^{0.4} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (\text{eq. 2.5})$$

- Zona B

$$q_h = 0.5 \times \rho \times 33^2 \times (h/10)^{0.4} \quad [N/m^2] \quad (\text{eq. 2.6})$$

Onde:

$\rho$  - Densidade do ar de valor  $1,225 \text{ kg/m}^3$  a uma temperatura de  $15^\circ\text{C}$  e uma pressão atmosférica de  $1013 \text{ hPa}$ ;

Através das equações anteriores é possível calcular alguns valores típicos para a pressão dinâmica do vento consoante a altura em questão [1]:

Tabela 2-1 – Pressão dinâmica do vento

h [m]	$q_h$ [Pa]	
	Zona A	Zona B
0	727	880
10	727	880
20	727	880
30	855	1035
40	960	1161
50	1049	1270
60	1129	1366
70	1201	1453
80	1266	1532
90	1328	1606

#### Força do vento sobre os constituintes das linhas

A força provocada pelo vento ao soprar numa direção horizontal e perpendicular a um elemento x da linha, pode ser calculada através da seguinte equação [1]:

$$F_v = q_h \times G_q \times G_x \times C_x \times A \quad [N/m^2] \quad (\text{eq. 2.7})$$

Sendo:

$q_h$  - Pressão dinâmica do vento em Pa;

$G_q$  - Fator de rajada (normalmente toma valor 1);

$G_x$  - Fator de ressonância estrutural, tem o valor de 0,6 para condutores e cabos de guarda e de 1,0 para apoios e isoladores;

$C_x$  - Coeficiente de forma do elemento da linha considerado;



Tabela 2-2 – Variação do coeficiente de forma conforme o diâmetro do condutor

Diâmetro [mm]	Coeficiente de forma c [sem unidades]
Até 12,5	1.2
De 12,5 a 15,8	1.1
Acima de 15,8	1.0

$A$  - Área do elemento da linha considerado, projectada num plano perpendicular ao vento em  $m^2$ ;

### 2.2.2 Ação do gelo sobre as Linhas

Nas épocas mais frias do ano, com a diminuição da temperatura e conforme a altitude do local, existe a possibilidade de formação de mangas de gelos nos condutores. Este facto vai levar a um aumento do diâmetro e do peso dos condutores, alterações que influenciam o cálculo mecânico.

Em Portugal, apenas se considera a formação de mangas de gelo em altitudes superiores a 600 metros nos seguintes distritos [1]:

- Viana do Castelo, Braga, Vila Real, Bragança, Porto, Viseu, Guarda, Castelo Branco, Coimbra e Portalegre

Posto isto, a carga de gelo, segundo a Norma IEC50341-3-17 (pág. 11), é obtida através da seguinte equação:

$$I_k = 11 \times \frac{10 + d}{40} [N/m] \quad (\text{eq. 2.8})$$

Sendo  $d$  o diâmetro do condutor em mm.

Notas:

- O modelo para as cargas de gelo descrito é consistente com a deposição de neve húmida ou de gelo duro sobre condutores e cabos de guarda. Não serão consideradas cargas de gelo sobre as estruturas ou sobre os isoladores, exceto indicação em contrário [1];
- A carga mínima de gelo pode ser modelizada como uma manga de gelo de espessura 10 mm e densidade  $900 \text{ kg/mm}^2$ ;

### 2.2.3 Ação da temperatura sobre as Linhas

As redes de transporte e distribuição de energia elétrica estão sujeitas a uma variação elevada de temperatura. Os cabos que as constituem possuem um elevado coeficiente de dilatação térmica, o que leva a que se verifique um aumento ou diminuição significativa do seu diâmetro conforme a variação de temperatura seja positiva ou negativa. Assim, de forma a

controlar a variação das flechas dos condutores, o controlo da temperatura revela-se importantíssimo [4].

Segundo a Norma IEC50341-3-17, a temperatura mínima de projeto, caso não se verifique outra ação climática é de  $-5^{\circ}\text{C}$ , ou em caso de zonas de gelo  $-10^{\circ}\text{C}$ . As temperaturas máximas aplicadas no cálculo de flechas máxima ou para efeitos de distribuição de apoios não deve ser inferior a  $75^{\circ}\text{C}$  para condutores e  $50^{\circ}\text{C}$  para cabos de guarda.

## 2.3 - Estados Atmosféricos

Os agentes atmosféricos atrás analisados variam ao longo do ano e ao conforme a região do globo. Posto isto, estão definidos no Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T.) três estados atmosférico tipo [5]:

- Estado de Inverno - também designado por estado de vento reduzido, é caracterizado pela temperatura mínima, velocidade de vento média e pela possível formação de mangas de gelo.
- Estado de Primavera - também designado por estado de vento máximo, é caracterizado pela temperatura média (cerca de  $15^{\circ}\text{C}$ ), velocidade de vento elevada e pela ausência de mangas de gelo.
- Estado de Verão - é caracterizado pela temperatura máxima, ausência de vento e pela impossibilidade de formação de manga de gelo.

## 2.4 - Coeficientes de Sobrecarga

Os coeficientes de sobrecarga procuram integrar o efeito dos agentes atmosféricos no cálculo mecânico dos condutores. As ações exercidas sobre um condutor podem ser genericamente representadas da seguinte forma:

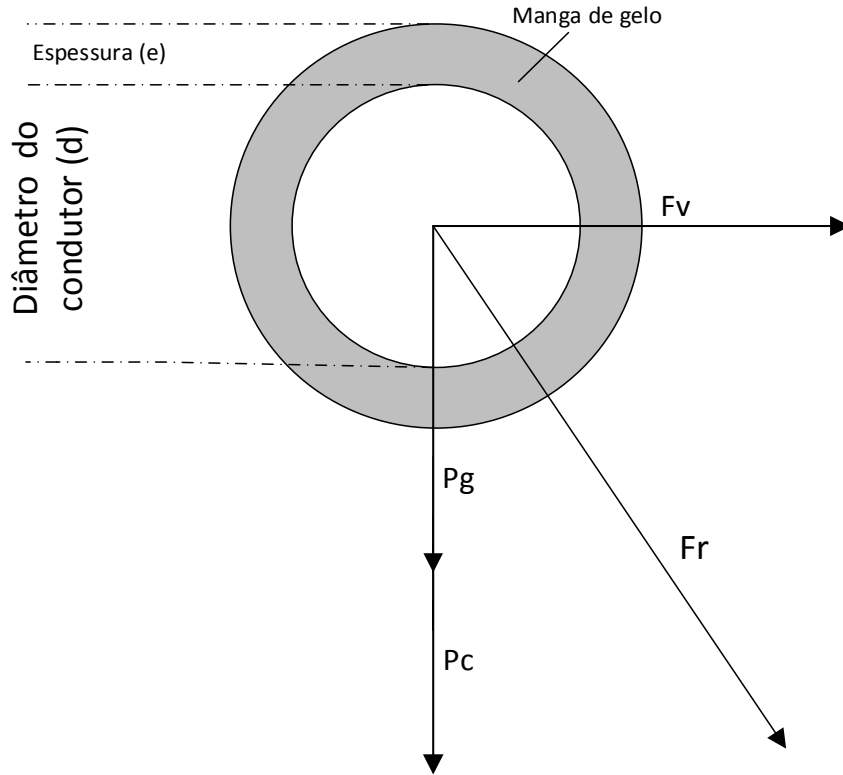


Figura 2-1 - Condutor com manga de gelo, adaptada de [2].

A força resultante  $F_r$  será então dada por:

$$F_r = \sqrt{(P_c + P_g)^2 + F_v^2} \text{ [daN/m]} \quad (\text{eq. 2.9})$$

Sendo  $F_v$  a força exercida pelo vento sobre o cabo em daN/m e  $P_c$  o peso próprio do cabo em daN/m. Este é dado por:

$$P_c = \omega_v \times \sigma \text{ [kg]} \quad (\text{eq. 2.10})$$

Onde:

$\omega_v$  - Peso volumétrico do elemento constituinte do cabo em  $\text{kg/mm}^2$ ;

$\sigma$  - Secção do cabo em  $\text{mm}^2$ ;-

$P_g$  - Peso da manga de gelo em daN/m;

O peso da manga de gelo é da pela seguinte equação [2]:

$$P_g = \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2] \text{ [kg]} \quad (\text{eq. 2.11})$$

Sendo:

$\omega_g$  - Peso específico volumétrico do gelo;

$e$  - Espessura da manga de gelo em metros;

$d$  - Diâmetro do condutor em metros;

Conclui-se então que  $F_r$  é obtida através da seguinte equação:

$$F_r = \sqrt{(\omega_v \times \sigma + \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2])^2 + F_v^2} \text{ [daN/mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 2.12})$$

Os coeficientes de sobrecarga  $m$ , pretendem representar as ações do gelo e do vento como de um aumento do peso se tratasse. Ou seja, sabendo que estes correspondem ao quociente da força resultante pelo peso do corpo, a sua equação é a seguinte:

$$m = \frac{\sqrt{(\omega_v \times \sigma + \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2])^2 + F_v^2}}{\omega_v \times \sigma} \quad (\text{eq. 2.13})$$

Analisando a equação anterior verifica-se que, quando não existe vento nem gelo, ou seja, quando estamos no estado de Verão, o valor que obtido é unitário.

## 2.5 - Equação dos Estados

A temperatura tem uma forte influência sobre os condutores. Os coeficientes de dilatação térmica linear dos materiais com que os cabos são fabricados têm valores significativos, o que leva a que, quando a temperatura varia, ocorram contrações (caso esta diminua) ou dilatações (caso esta aumente) no condutor. Como a flecha e a tração dependem do comprimento do cabo, estes vão também ser afetados pela variação da temperatura. A maneira mais cómoda de calcular as variações provocados pela passagem do estado  $j$  para o estado  $k$  é através das equações de estado:

$$\theta_k + \frac{t_k}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} = \theta_j + \frac{t_j}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2} \quad (\text{eq. 2.14})$$

Sendo:

$\theta_k$  a temperatura estado  $k$  em graus;

$\theta_j$  a temperatura estado  $j$  em graus;

$t_k$  a tração do estado  $k$  em daN/mm<sup>2</sup>;

$t_j$  a tração do estado  $j$  em daN/mm<sup>2</sup>;

$m_k$  o coeficiente de sobrecarga do estado  $k$ ;

$m_j$  o coeficiente de sobrecarga do estado  $j$ ;

$L$  o vão equivalente do cantão em metros;

$\alpha$  o coeficiente de dilatação linear do condutor;

$E$  o módulo de Young do condutor em daN/mm<sup>2</sup>

A dedução completa da equação (eq. 2.14) encontra-se no Anexo B.

## 2.6 - Vão Crítico

Intitula-se por vão crítico, o vão em que os condutores estão sujeitos à tração máxima quer no estado de Inverno quer no estado de Primavera. O seu cálculo é efetuado de forma simples através da equação dos estados (eq. 2.14) tal como demonstrado no anexo B.

$$L_{cr} = \frac{\sigma \times t}{\omega} \times \sqrt{\frac{(\theta_k - \theta_j) \times 24 \times \alpha}{(m_k^2 - m_j^2)}} [m] \quad (\text{eq. 2.15})$$

## 2.7 - Estado Atmosférico mais Desfavorável

Uma forma simples de determinar qual o estado mais desfavorável é através da árvore de decisão:

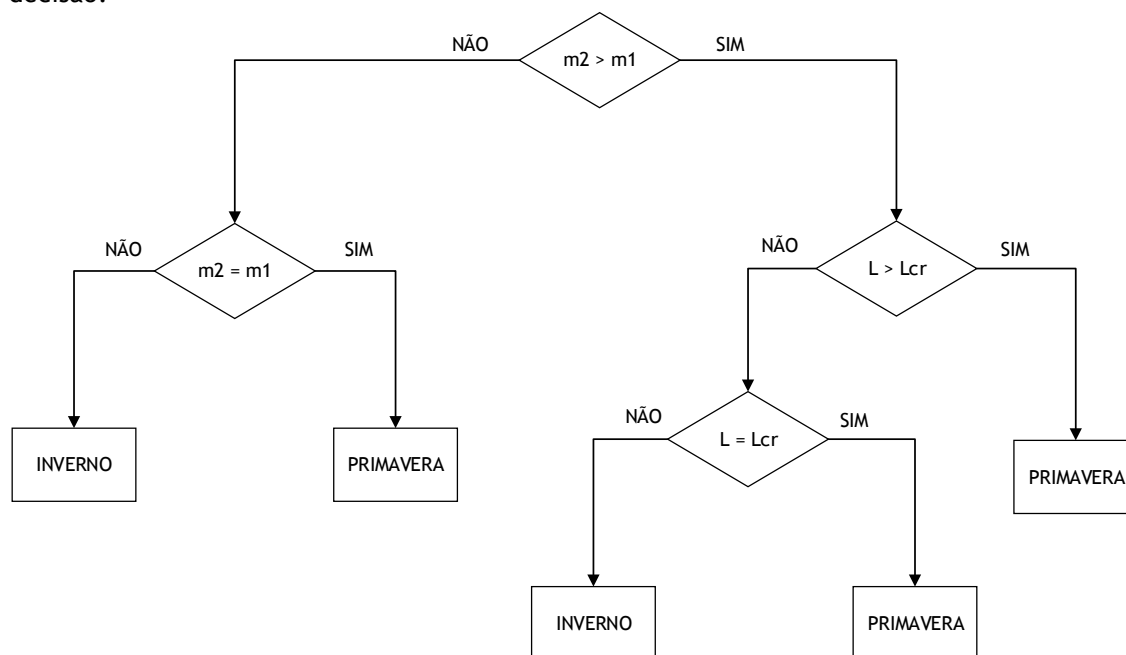


Figura 2-2 - Árvore de decisão [2] [6] [7].

Onde  $L$  é o vão equivalente do cantão,  $L_{cr}$  o vão crítico deste e  $m_1$  e  $m_2$  os coeficientes de sobrecarga do estado de Inverno e Primavera respetivamente. A determinação do estado mais desfavorável é essencial para o cálculo mecânico das linhas. O estado mais desfavorável determinado é utilizado na equação de estados de forma a obter a tração mecânica máxima a que os condutores pertencentes ao cantão em análise vão estar submetidos.

## 2.8 - Vão Equivalente

Quando se está na presença de uma linha com diversos vãos, formando um cantão, é necessário calcular aquilo que se denomina de vão equivalente. Este vão equivalente é utilizado na equação de estados para o cálculo das trações na linha. A tração calculada, utilizando o conceito de vão equivalente, considera-se igual em todos os seus vãos constituintes.

O vão equivalente é calculado através da seguinte equação que se encontra deduzida no anexo B [8] [9]:

$$L_e = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} [m] \quad (\text{eq. 2.16})$$

Onde  $L_i$  é o comprimento de cada um dos vãos que constituem o cantão para o qual se está a determinar o vão equivalente.

Apesar de ser a equação utilizada, a equação (eq. 2.16), em rigor só pode ser aplicada a apoios que se encontrem no mesmo patamar e em cantão. [10]. Quando, a linha se encontra num terreno montanhoso, o vão equivalente é dado pela equação[11]:

$$L_e = \frac{\sum b_i}{\sum L_i} \times \sqrt{\frac{\sum L_i^5}{\sum b_i^2}} [m] \quad (\text{eq. 2.17})$$

Onde:

$$b_i = \sqrt{L_i^2 + h_i^2} \quad (\text{eq. 2.18})$$

Sendo  $L_i$  o comprimento do vão  $i$  e  $h_i$  a altura a que se encontra o apoio  $i$ , ambos em metros. Se a altura  $h$  tomar sempre o valor 0, a equação (eq. 2.17) toma a forma da equação (eq. 2.16), o que prova que esta última é apenas uma aproximação.

## 2.9 - Curvas Representativas do Comportamento da Curva Catenária nas Diferentes Situações

Ao longo dos anos diversas aproximações matemáticas têm sido utilizadas para tratar a geometria das curvas, de forma a se poder determinar com mais precisão parâmetros como a flecha e comprimento dos condutores. Nos tempos correntes a aproximação que melhor consegue reproduzir o comportamento dos condutores em linhas aéreas é a aproximação pela curva catenária [12].

A análise através da aproximação catenária varia conforme os apoios do cantão se encontrem no mesmo patamar ou caso estejam em patamares diferentes. A curva catenária pode muitas vezes ser aproximada a uma curva parabólica de forma a simplificar o cálculo. Apesar de na maior parte das situações práticas as aproximações parabólicas serem bastante satisfatórias, visto o valor das flechas ser inferior a 5% do comprimento do vão [13], e de serem mais fáceis de tratar, introduzem erros e por isso não vão ser consideradas em muitas situações.

Todas as deduções e demonstrações das equações a seguir apresentadas estão incluídas no anexo A.

### 2.9.1 Vão em patamar

A Figura 2-3 representa uma linha elétrica aérea, suportada por dois apoios, A e B, que se encontram distanciados entre si por distância  $L$ . Como estes se encontram no mesmo patamar, a curva catenária será simétrica em relação ao ponto  $L/2$  e a flecha será máxima nesse mesmo ponto. A flecha do condutor é indiretamente proporcional à tração aplicado ao condutor [14]. Neste estudo irá ser admitido algumas hipóteses simplificativas, como por exemplo o facto dos cabos serem perfeitamente flexíveis e inextensíveis [15].

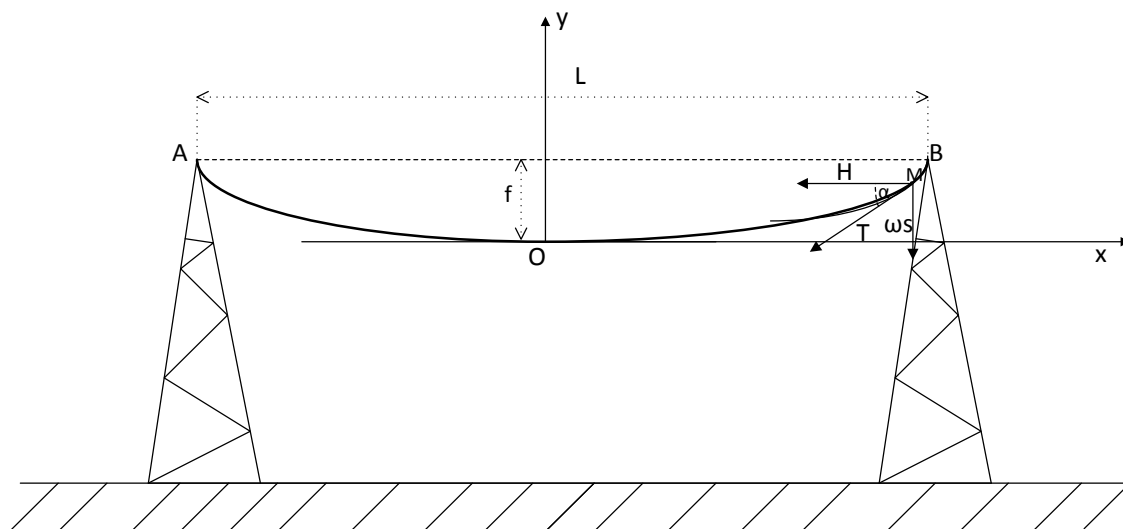


Figura 2-3 - Curva catenária representativa de um condutor num vão em patamar [16] [17].

A equação que traduz a catenária da Figura 2-3 é a seguinte:

$$y = \frac{H}{\omega} \times \cosh\left(\frac{\omega \cdot x}{H}\right) - \frac{H}{\omega} \quad (\text{eq. 2.19})$$

Onde:

H - Componente horizontal tração de montagem em daN;

$\omega$  - peso próprio do condutor em daN/m;

x - valor da ordenada no ponto especificado, ponto M;

Considerando o parâmetro da catenária P, como sendo [18]:

$$P = \frac{H}{\omega} \quad [m] \quad (\text{eq. 2.20})$$

Resulta que:

$$y = P \times \left( \cosh\left(\frac{x}{P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. 2.21})$$

O comprimento do cabo s, num determinado ponto de abcissa x, pode ser obtido através da seguinte equação:

$$s = P \times \sinh\left(\frac{x}{P}\right) \quad (\text{eq. 2.22})$$

Já o comprimento total do cabo entre os suportes A e B, é dado por:

$$S = 2 \times P \times \sinh\left(\frac{L}{2 \times P}\right) \quad (\text{eq. 2.23})$$

Como foi referido anteriormente, a flecha do cabo será máxima para  $x = \frac{L}{2}$ , assim, a equação que permite o cálculo da mesma é a seguinte:

$$y = P \times \left( \cosh\left(\frac{L}{2P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. 2.24})$$

Ao contrário do que acontece com a tração H, que é constante ao longo da curva, o mesmo não se verifica com a tração T, que varia ao longo da curva, em função da distância do ponto considerado ao vértice da catenária [11].

$$T = H \times \cosh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) \quad (\text{eq. 2.25})$$

O ângulo  $\alpha$ , num determinado ponto de abscissa  $x$ , pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\sinh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right)\right) \quad (\text{eq. 2.26})$$

### 2.9.2 Vão em declive

A presença de vãos em declive, ou seja onde os apoios se encontram a patamares diferente, é uma situação frequente em redes elétricas aéreas. Neste caso serão usadas algumas das equação já obtidas para o caso de vãos em patamar, como é o caso da equação da catenária, que se manterá a mesma. O referencial será alterado de forma a simplificar a análise.

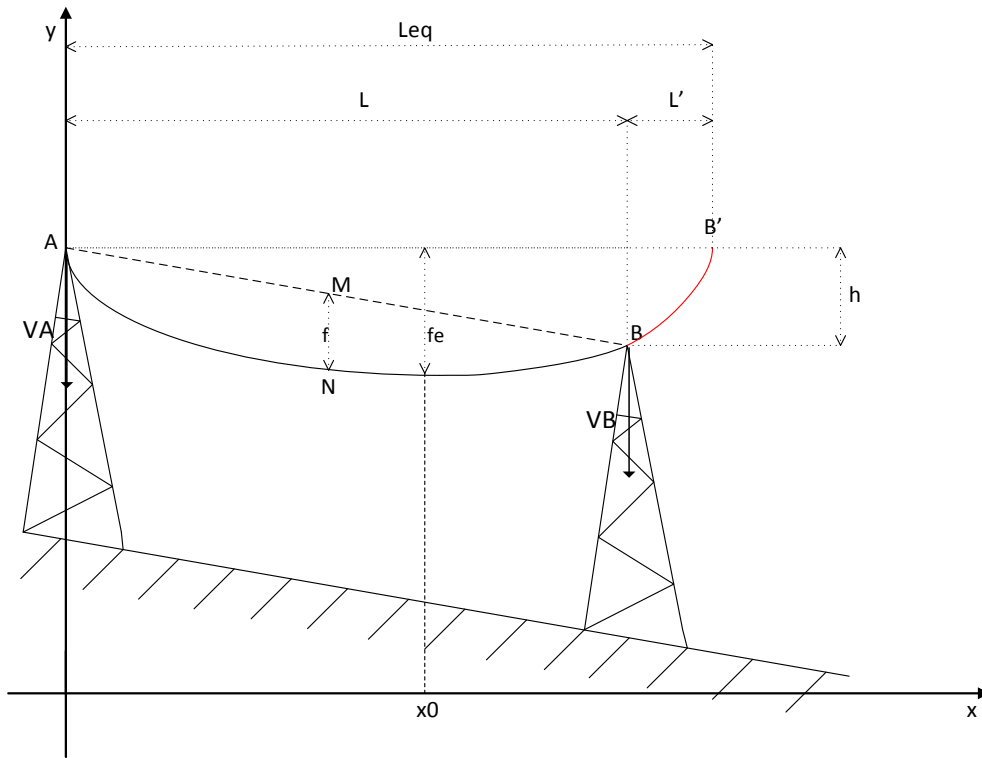


Figura 2-4 - Curva representativa de um condutor num vão em declive [17]

Seja  $h$  a diferença de alturas entre os suportes A e B, verifica-se que este pode ser calculado com base na seguinte equação:

$$h = 2 \times P \times \sinh\left(\frac{x_A + x_B}{2 \times P}\right) \times \sinh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right) \quad (\text{eq. 2.27})$$

Já o comprimento total do cabo  $S$  é dado em função da diferença de alturas  $h$  e da distância entre os apoios  $L$  por:

$$S = \sqrt{h^2 + \left(2 \times P \times \sinh\left(\frac{L}{2 \times P}\right)\right)^2} \quad (\text{eq. 2.28})$$

Definindo a flecha como a sendo a distância entre o ponto M, correspondente ao ponto médio entre os apoios A e B, e o ponto N da curva catenária, esta é dada por:

$$f = P \times \cosh\left(\frac{x_M}{P}\right) \left(\cosh\left(\frac{L}{2 \times P}\right) - 1\right) \quad (\text{eq. 2.29})$$



No cálculo mecânico de redes aéreas, é necessário conhecer as características do ponto mais baixo da catenária, este pode ser analisado através da Figura 2-5.

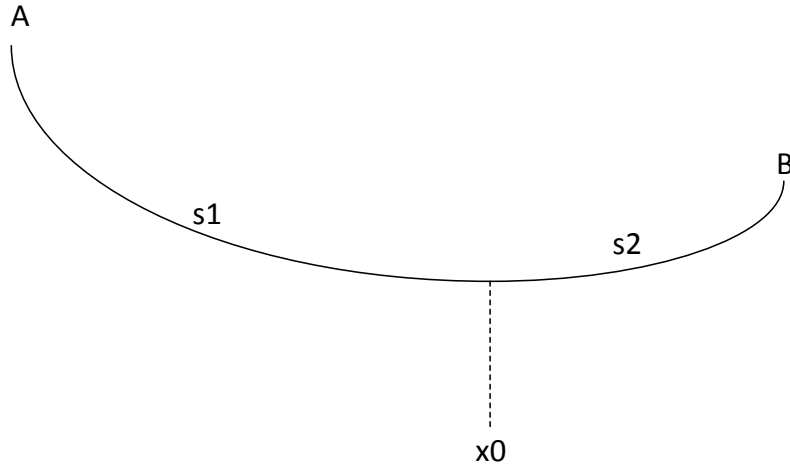


Figura 2-5 - Ponto mais baixo da curva catenária.

Onde a abcissa do ponto  $x_0$  é:

$$x_0 = \frac{L}{2} - P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L}{2 \times P} \right)} \right) \quad (\text{eq. 2.30})$$

E a ordenada do ponto  $x_0$  é dada por:

$$y_0 = P \times \left( \cosh \left( \frac{x_0}{P} \right) - 1 \right) \quad (\text{eq. 2.31})$$

Seja  $B'$  o ponto obtido quando se prolonga a curva catenária, de forma a obter um vão nivelado. Analisando a Figura 2-4 é fácil de perceber que o valor de  $Leq$  é obtido da seguinte forma:

$$Leq = L + L' \quad (\text{eq. 2.32})$$

Onde  $Leq$  é o comprimento do vão fictício, no caso de se deslocar o apoio B para o mesmo nível de A e  $L'$  a distância que o apoio B teria de se deslocar segundo o eixo das abcissas para que o mesmo aconteça, tal como se observa na Figura 2-4 .

Ou, e de acordo com a Figura 2-4,  $Leq = 2 \times |x_0|$  [19]:

$$Leq = L + 2 \times P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L}{2 \times P} \right)} \right) \quad (\text{eq. 2.33})$$

Utilizando uma aproximação parabólica:

$$Leq = L + \frac{2 \times P \times h}{L} = L + \frac{2 \times H \times h}{L \times \omega} \quad (\text{eq. 2.34})$$

E com  $L'$  dado por:

$$L' = 2 \times P \times \left( \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{x_H}{P} \right)} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{x_m - x_0}{P} \right)} \right) \right) \quad (\text{eq. 2.35})$$

Ou, fazendo uso da aproximação parabólica:

$$L' = \frac{2 \times P \times h}{L} \quad (\text{eq. 2.36})$$

Dependendo da sua posição, cada apoio vai estar sujeito a um conjunto de esforços, são eles:

- Apoio A - Neste caso corresponde ao apoio que se encontra numa posição superior: Sobre o eixo vertical apenas estará sujeito a uma força VA.

$$VA = \frac{\omega \times Leq}{2} = \omega \times P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{x_H}{P} \right)} \right) \quad (\text{eq. 2.37})$$

Ou, utilizando a aproximação parabólica

$$VA = \frac{\omega \times L}{2} + \frac{H \times h}{L} \quad (\text{eq. 2.38})$$

Admitindo H com sendo constante ao longo da curva, a tração TA não será. Esta, de acordo com a Figura 2-3 é dada por:

$$TA^2 = H^2 + VA^2 \quad (\text{eq. 2.39})$$

E, através da aplicação de ferramentas matemáticas, é possível afirmar que [11]:

$$TA = H + \frac{VA^2}{2 \times H} \quad (\text{eq. 2.40})$$

Substituindo VA pela equação (eq. 2.37):

$$TA = H + \frac{\omega^2 \times Leq^2}{8 \times H} \quad (\text{eq. 2.41})$$

Ou, fazendo uso da aproximação parabólica para o cálculo da flecha da equação (eq. A.25):

$$TA = H + fe \times \omega \quad (\text{eq. 2.42})$$

- Apoio B - Neste caso corresponde ao apoio que se encontra numa posição inferior: Sobre o eixo vertical, o apoio B estará sujeito a uma força VB correspondente ao peso do cabo multiplicado pelo comprimento desde vértice B até ao ponto mais baixo da catenária, x0.

$$VB = \omega \times \left( \frac{Leq}{2} - L' \right) = \frac{\omega \times L}{2} - \frac{H \times h}{L} \quad (\text{eq. 2.43})$$

Neste caso foi utilizada uma aproximação parabólica devido á elevada complexidade da equação. Existem situações em que, Leq/2 tem um valor inferior a L', nesses casos a equação será:

$$VB = \omega \times \left( L' - \frac{Leq}{2} \right) = \frac{H \times h}{L} - \frac{\omega \times L}{2} \quad (\text{eq. 2.44})$$

Á semelhança do que se verificou para o apoio A,

$$TB^2 = H^2 + VB^2 \quad (\text{eq. 2.45})$$

Usando o mesmo método resulta que:

$$TB = H + \frac{VB^2}{2 \times H} \quad (\text{eq. 2.46})$$

Substituindo VB pela sua equação:

$$TB = H + \frac{\omega^2 \times Leq^2}{8 \times H} - \frac{\omega^2 \times L'^2}{2 \times H} \quad (\text{eq. 2.47})$$

Usando a aproximação parabólica:

$$TB = H + (fe - h) \times \omega \quad (\text{eq. 2.48})$$

## 2.10 - Vãos Contínuos

Nas linhas aéreas, a presença de vãos contínuos é o cenário mais comum, sendo que a presença de vãos isolados apenas acontece em situações ocasionais. Ou seja, é necessário analisar as diferentes situações possíveis [11].

### 1ª Situação: Cantão com um apoio em suspensão, em patamar e vãos com o mesmo comprimento.

No primeiro caso analisado todos os vãos têm o mesmo comprimento e os apoios encontram-se a mesma altura.

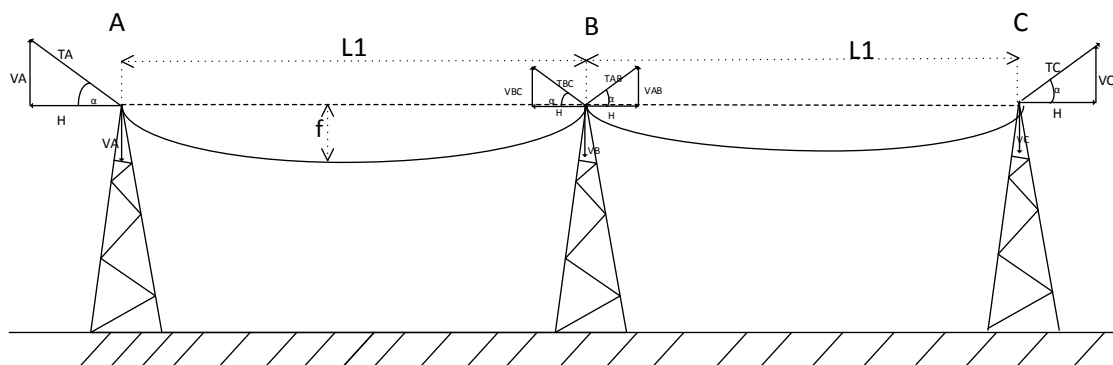


Figura 2-6 - Cantão composto por um apoio em suspensão e em patamar, e vãos com o mesmo comprimento.

Sejam  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$  as forças verticais nos apoios A, B e C respectivamente. Nos apoios A e C, as forças verticais são dadas por:

$$V_A = V_C = \frac{\omega \times L1}{2} \quad (\text{eq. 2.49})$$

E as forças horizontais por:

$$T_A = T_C = \frac{H}{\cos(\alpha)} \quad (\text{eq. 2.50})$$

Por sua vez, o apoio B, apenas terá componente vertical pois, como os vãos são iguais, as suas componentes horizontais anulam-se.

$$V_B = \omega \times L \quad (\text{eq. 2.51})$$

- *Exemplo 2.1 - Cantão com um apoio em suspensão, em patamar e vãos com o mesmo comprimento.*

Enunciado:

Tendo por base a Figura 2-6, calcular as forças verticais e horizontais quando:

$L1=300$  metros;

$H = 600$  daN por vão;

$\omega = 0.7816$  daN/m;

Resolução:

Analisando a Figura 6 verifica-se que:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{VA}{H}$$

Utilizando a equação (eq. 2.49), resulta que:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\omega \times L1}{2 \times H}$$

Logo, substituindo pelos valores do enunciado:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{0.7816 \times 300}{2 \times 600} \right) \cong 11^\circ$$

Para os apoios A e C:

$$VA = VC = \frac{\omega \times L1}{2} = 117.24 \text{ daN}$$

$$TA = TC = \frac{H}{\cos(\alpha)} = \frac{600}{\cos(11)} = 611.23 \text{ daN}$$

Para o apoio B:

$$VB = \omega \times L = 0.7816 \times 300 = 234.48 \text{ daN}$$

$$TB = 0 \text{ daN}$$

## 2ª Situação: Cantão com um apoio em suspensão, em patamar e vãos com comprimentos desiguais.

Num segundo caso, vai ser analisada o que acontece quando se verificam vãos com comprimentos desiguais e a alturas iguais.

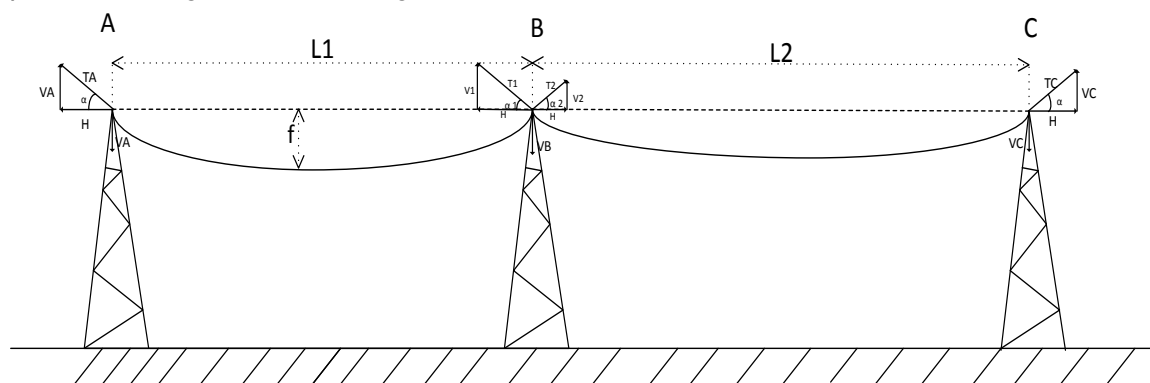


Figura 2-7 - Cantão composto por um apoio em suspensão e em patamar, e vãos com comprimentos desiguais

Na Figura 2-7 pode ser observado um exemplo do segundo caso sendo que o comprimento L2 é superior ao comprimento L1.

As forças verticais em cada apoio, ao contrário do que acontecia anteriormente, já não vão ser iguais nos apoios extremos, pois o comprimento do vão adjacente é diferente.

$$VA = \frac{\omega \times L1}{2} \quad (\text{eq. 2.52})$$

$$VC = \frac{\omega \times L2}{2} \quad (\text{eq. 2.53})$$

As forças horizontais H, vão ser constantes ao longo de todo o cabo e são absorvidas pelas estruturas terminais da linha [11].

$$TA = \frac{H}{\cos(\alpha)} \quad (\text{eq. 2.54})$$

$$TC = \frac{H}{\cos(\alpha)} \quad (\text{eq. 2.55})$$

No apoio B, a força vertical vai ser o somatório de duas componentes, V1 e V2.

$$VB = V1 + V2 = \frac{\omega \times L1}{2} + \frac{\omega \times L2}{2} = \omega \times \left( \frac{L1 + L2}{2} \right) \quad (\text{eq. 2.56})$$

A sua componente horizontal neste caso não será na mesma nula pois, como foi dito anteriormente, H mantém-se constante ao longo do cabo, mas o ângulo  $\alpha$  irá ser diferente. Isto provoca que nos vãos de maior comprimento, a componente T seja superior.

$$TB = TBC - TAB \quad (\text{eq. 2.57})$$

- *Exemplo 2.2 - Cantão com um apoio em suspensão, em patamar e vãos com comprimentos desiguais.*

Enunciado:

Tendo por base a Figura 2-7, calcular as forças verticais e horizontais no apoio B quando:

$L1 = 300 \text{ m}$ ;  $L2 = 600 \text{ m}$ ;

$H = 600 \text{ daN}$  por vão;

$\omega = 0.7816 \text{ daN/m}$ ;

Resolução:

Analisando a Figura 2-7 verificamos que:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V}{H}$$

Ou seja

$$\alpha1 = \tan^{-1} \frac{\omega \times L2}{\frac{2 \times H}{\omega \times L1}}$$

$$\alpha2 = \tan^{-1} \frac{\omega \times L1}{\frac{2 \times H}{\omega \times L2}}$$

Substituindo pelos valores do enunciado:

$$\alpha1 = \tan^{-1} \left( \frac{0.7816 \times 600}{\frac{2 \times 600}{0.7816 \times 300}} \right) \cong 21.35^\circ$$

$$\alpha2 = \tan^{-1} \left( \frac{0.7816 \times 300}{\frac{2 \times 600}{0.7816 \times 600}} \right) \cong 11^\circ$$

Vem então que:

$$VB = \frac{\omega \times (L1 + L2)}{2} = 351.72 \text{ daN}$$

$$T1 = \frac{H}{\cos(\alpha1)} = \frac{600}{\cos(21.35)} = 644.21 \text{ daN}$$

$$T2 = \frac{H}{\cos(\alpha2)} = \frac{600}{\cos(11)} = 611.23 \text{ daN}$$

### 3ª Situação: Cantão com um apoio em suspensão, em declive e vãos com comprimentos desiguais.

Por fim, o terceiro caso consiste em analisar o que acontece quando os vãos têm comprimentos diferentes e encontram-se a patamares diferentes. Esta situação é a mais comum nas redes aéreas, principalmente em Portugal que possui um terreno acidentado.

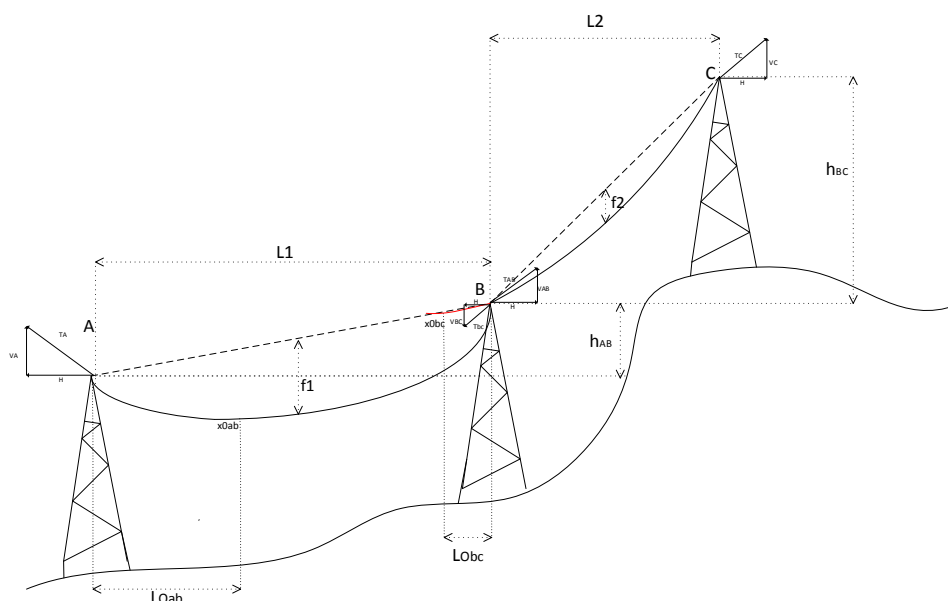


Figura 2-8 - Cantão composto por um apoio em suspensão e em declive, e vãos com comprimentos desiguais

Na Figura 2-8 está representado um exemplo da terceira situação, onde o comprimento  $L1$  é superior a  $L2$ , e onde os três apoios encontram-se em patamares diferentes. À semelhança das situações anteriores, vão ser agora analisados os esforços em cada um dos três apoios.

O apoio A vai estar sujeito a uma força vertical,  $VA$ , a uma força horizontal constante  $H$  e a uma tração  $TA$ .

$$VA = LOab \times \omega \quad (\text{eq. 2.58})$$

Visto o apoio A corresponder ao apoio com menor altitude do vão, a força  $TA$  vai ser calculada de acordo com a equação (eq. 2.48).

$$TA = H + (fe1 - h_{ab}) \times \omega \quad (\text{eq. 2.59})$$

Onde  $fe1$  corresponde à flecha do vão complementar de AB.

O Apoio B está sujeito a diversas forças. No eixo vertical,  $VB$ , vai ser o resultado do somatório das forças referentes ao vão AB e BC.

$$VB = VAB - VBC = [(L1 - LOab) - LObc] \times \omega \quad (\text{eq. 2.60})$$

De realçar que, como se vê na Figura 2-8, se se prolongar a catenária de forma a obter o vão complementar, o ponto mais baixo desta encontra-se a esquerda do apoio, razão pela qual  $VBC$  tem valor negativo. A tração  $TB$  vai ser calculada de forma análoga a  $TA$ .

$$\begin{aligned} TB &= TBA - TBC = H + fe1 \times \omega - [H + (fe2 - h_{bc}) \times \omega] \\ &= \omega \times (fe1 - fe2 + h_{bc}) \end{aligned} \quad (\text{eq. 2.61})$$

Onde  $fe2$  corresponde o comprimento da flecha do vão complementar de BC.

Por fim, o apoio C, comporta-se como sendo o apoio em posição superior no vão BC, e esta sujeito a uma força vertical  $VC$ .

$$VC = (L2 + LObc) \times \omega \quad (\text{eq. 2.62})$$

$$TC = H + fe2 \times \omega \quad (\text{eq. 2.63})$$

- *Exemplo 2.3 - Cantão com um apoio em suspensão, em declive e vãos com comprimentos desiguais.*

Enunciado:

Tendo por base a Figura 2-8, calcular as forças verticais e horizontais no apoio B quando:

$L1 = 250 \text{ m}$ ;  $L2 = 150 \text{ m}$ ;

$H = 600 \text{ daN}$  por vão;

$\omega = 0.7816 \text{ daN/m}$ ;

$h_{AB}=10 \text{ m}$ ;  $h_{BC}=30 \text{ m}$ ;

Resolução:

$$P = \frac{H}{\omega} = 767.656 \text{ m}$$

Com base na equação (eq. 2.33):

$$Leq = L + 2 \times P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L}{2 \times P} \right)} \right)$$

$$Leq1 = L1 + 2 \times P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h_{ab}}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L1}{2 \times P} \right)} \right) = 311.126 \text{ m}$$

Utilizando a aproximação parabólica o resultado seria de 311.416 metros o que demonstra pouca diferença no uso da aproximação parabólica.

$$Leq2 = L2 + 2 \times P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h_{bc}}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L2}{2 \times P} \right)} \right) = 454.573 \text{ m}$$

Com a aproximação parabólica o resultado seria 457.062 metros. Agora é necessário calcular as flechas dos vãos complementares utilizando a equação (eq. 2.21):

$$fe1 = P \times \left( \cosh \left( \frac{Leq1}{2P} \right) - 1 \right) = 15.8162 \text{ m}$$

$$fe2 = P \times \left( \cosh \left( \frac{Leq2}{2P} \right) - 1 \right) = 33.8938 \text{ m}$$

Os comprimentos  $LO_{ab}$  e  $LO_{bc}$  serão calculados utilizando a equação (eq. 2.27):

$$x_0 = \frac{L}{2} + P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L}{2 \times P} \right)} \right)$$

$$LO_{AB} = \frac{L1}{2} - P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h_{ba}}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L1}{2 \times P} \right)} \right) = 94.44 \text{ m}$$

$$LO_{BC} = \frac{L2}{2} - P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h_{bc}}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L2}{2 \times P} \right)} \right) = -77.286 = 77.29 \text{ m}$$

Agora já é possível calcular os esforços em cada apoio.

- Apoio A:

$$VA = LO_{ab} \times \omega = 94.44 \times 0.7816 = 73.8143 \text{ daN}$$

$$TA = H + (fe1 - h_{ab}) \times \omega = 600 + (15.8162 - 10) \times 0.7816 = 604.55 \text{ daN}$$

- Apoio B:

$$VB = VAB - VBC = [(L1 - LOab) - LObc] \times \omega = 61.18 \text{ daN}$$

$$TB = TBA - TBC = H + fe1 \times \omega - [H + (fe2 - h_{bc}) \times \omega] = \omega \times (fe1 - fe2 + h_{bc}) = 9.32 \text{ daN}$$

- Apoio C

$$VC = (L2 + LObc) \times \omega = 117.65 \text{ daN}$$

$$TC = H + fe2 \times \omega = 626.49 \text{ daN}$$

#### Apoio Enforcado

A situação de apoio enforcado é um caso especial da 3ª situação analisada anteriormente e consiste em, quando um apoio em suspensão é colocado a um patamar bastante inferior aos adjacentes. Esta situação está ilustrada na Figura 2.9.

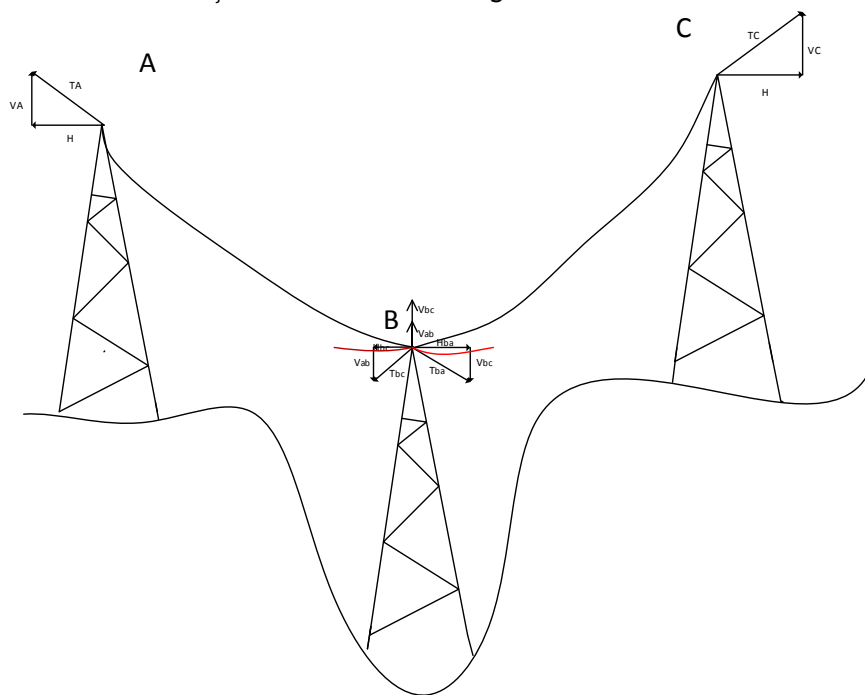


Figura 2-9 - Situação Enforcamento

Esta disposição dos apoios pode levar a que no apoio B seja aplicada uma força ascendente sobre os isoladores, o que pode provocar, dependendo do estado atmosférico e das trações dos cabos, uma rotação destes de 180 graus, ou seja, levar a que estes fiquem virados ao contrário. Estas situações devem ser evitadas ao máximo, e quando se verificar tal situação é necessário aplicar amarração. A força sobre o apoio B, em situações extremas é dada por:

$$VB = -(VAB + VBC) \quad (\text{eq. 2.64})$$



## **Capítulo 3**

# **Movimento das Cadeias de Isoladores em Suspensão**

O objetivo deste capítulo é analisar todas as distâncias de segurança que são necessárias garantir no projeto de redes elétricas aéreas do Sistema Elétrico de Energia (SEE). No movimento transversal e longitudinal das cadeias de isoladores (CI) serão efetuados diversos estudos e analisados os fatores que levam a estes. Será estudado o movimento da CI em diferentes situações, situações de ângulo, patamar e declive. O objetivo é, procurar estabelecer um limite para a diferença de comprimento entre vãos para cada situação, até o qual é possível a aplicação de CI em suspensão.

### **3.1 - Tipos de Isoladores Utilizados em Redes Elétricas Aéreas**

Os isoladores presentes nas redes de distribuição devem ser dimensionados tendo em conta todos os esforços a que, tanto os condutores como a própria cadeia, vão estar sujeitos. A escolha destes é também muitas, vezes afetada pela zona geográfica, sendo estes afetados por fatores como a poluição e vandalismo. As redes aéreas do Sistema Elétrico de Energia (SEE) são constituídas, não por isoladores isolados, mas sim por cadeias de isoladores (CI), sendo que o número de isoladores por cadeia é variável. O uso de CI apresenta diversas vantagens, destacando-se a flexibilidade e o fato de, no caso de avaria de um isolador, apenas ser necessário a substituição do isolador avariado [7]. Existem essencialmente dois tipos de CI: amarração e suspensão.

As cadeias de amarração estão normalmente dispostas horizontalmente. São cadeias que além de precisarem também de mais tempo de montagem, são também mais dispendiosas. Por outro lado são também mais seguras pois considera-se como sendo imóveis, apesar disso é necessário proceder ao corte do cabo na sua montagem. O fato de haver corte do cabo nem

sempre é negativo, pois em caso de avaria apenas tem de ser substituído o troço de cabo com defeito, sendo que é sempre possível realizar a exploração da rede de modo diferente. Este tipo de cadeia é utilizada em situações de ângulo ou declive severo e sempre que se verificar uma situação de enforcamento. Quando estamos sobre travessias de habitações, estradas ou caminhos-de-ferro, a utilização de cadeias em amarração é o tipo de CI adotada devido ao seu nível de segurança.

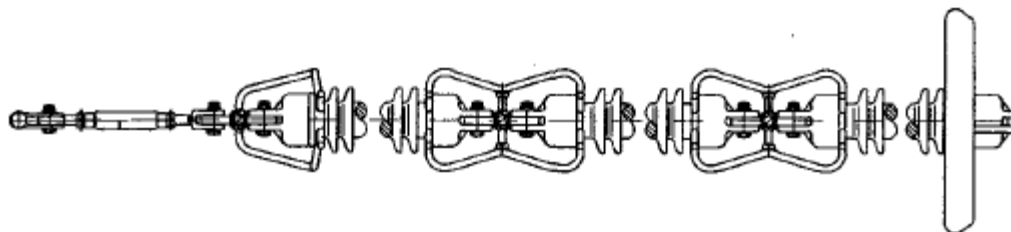


Figura 3-1 - Cadeia de isoladores em amarração [19].

As CI em suspensão são dispostas verticalmente, sendo que o condutor está colocado na parte inferior. Embora não seja tão estável e permita que, quando existem desequilíbrios, os isoladores se movam tanto transversalmente como longitudinalmente, é um tipo de cadeia que é bastante mais económica que a anterior e por isso deve ser, sempre que possível, utilizada em detrimento da anterior. Por outro lado em casos de avarias, visto não ser efetuado o corte do cabo por troços, é necessária a substituição do cabo completo.

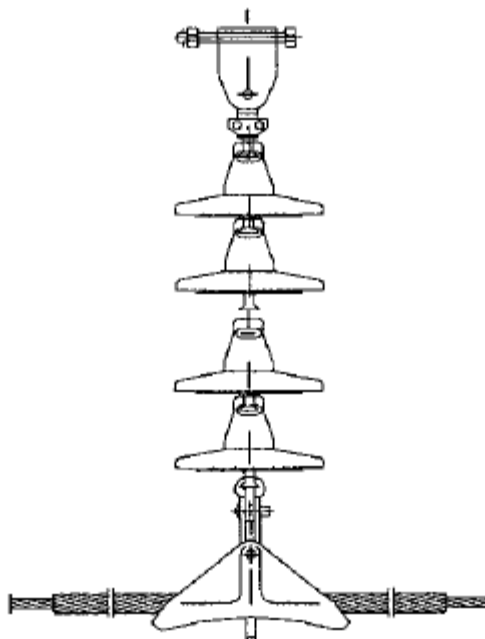


Figura 3-2 - Cadeia de isoladores em suspensão [19].

### 3.2 - Distâncias de Segurança entre Condutores e Outros Objetos

No projeto de uma linha aérea, existem diversas normas de segurança que devem ser respeitadas. Estas normas definem distâncias mínimas de segurança para que sejam evitados contactos que possam levar a situações crítica para o sistema e para a saúde das pessoas.

De forma a evitar os contornamentos elétricos existem, de acordo com a norma IEC50341-1, cinco tipo de distâncias elétricas, são elas [1]:

- I.  $D_{el}$  - Distância mínima para evitar uma descarga disruptiva entre condutores de fase e objetos que se encontrem ao potencial terra durante sobretensões de frente rápida ou lenta.  $D_{el}$  Pode ser considerada uma distância interna tendo em conta a distância dos condutores à estrutura do poste, ou externa considerando a distancia dos condutores a obstáculos.
- II.  $D_{pp}$  - Distância mínima para evitar uma descarga disruptiva entre condutores de fase, durante sobretensões de frente rápida ou lenta.  $D_{pp}$  é uma distância interna.
- III.  $D_{50Hz\_p\_e}$  - Distância mínima para evitar uma descarga disruptiva à frequência industrial entre um condutor de fase e objetos que se encontrem ao potencial terra.  $D_{50Hz\_p\_e}$  é uma distancia interna.
- IV.  $D_{50Hz\_p\_p}$  - Distância mínima para evitar uma descarga disruptiva à frequência industrial entre condutores de fase.  $D_{50Hz\_p\_p}$  é uma distancia interna.

- V.  $a_{som}$  - Valor mínimo de  $a_{50}$  - valor de uma linha. Menor valor da distancia em linha reta entre peças sobre tensão e peças ligadas à terra.

O calculo de  $D_{el}$  e  $D_{pp}$  é realizado de acordo com o anexo E da norma IEC50341-1 e consoante o tipo de sobretensão considerada. As fórmulas que permitem calcular as distâncias de segurança consoante o tipo de sobretensão são as seguintes [1]:

Para sobretensões de frente rápida ou de choque atmosférico:

$$D_{el} = \frac{U_{90\%_{ff-is}}}{530 \times K_a \times K_{z_{ff}} \times K_{g_{ff}}} [m] \quad (\text{eq. 3.1})$$

$$D_{pp} = \frac{1.2 \times U_{90\%_{ff-is}}}{530 \times K_a \times K_{z_{ff}} \times K_{g_{ff}}} [m] \quad (\text{eq. 3.2})$$

Para sobretensões de frente lenta ou de manobra:

$$D_{el} = \frac{1}{0.46} \times \left( e^{\frac{K_{cs} \times U_{e2\%_{sf}}}{1080 \times K_a \times K_{z_{sf}} \times K_{g_{sf}}} - 1} \right) [m] \quad (\text{eq. 3.3})$$

$$D_{pp} = \frac{1}{0.46} \times \left( e^{\frac{1.4 \times K_{cs} \times U_{e2\%_{sf}}}{1080 \times K_a \times K_{z_{sf}} \times K_{g_{sf}}} - 1} \right) [m] \quad (\text{eq. 3.4})$$

Para sobretensões à frequência industrial

$$D_{50Hz_{p-e}} = \left( \frac{e^{\frac{U_s}{750 \times \sqrt{3} \times K_a \times K_{z_{pf}} \times K_{g_{pf}}} - 1}}{0.55} \right)^{0.83} [m] \quad (\text{eq. 3.5})$$

$$D_{50Hz_{p-p}} = \left( \frac{e^{\frac{U_s}{750 \times \sqrt{3} \times K_a \times K_{z_{pf}} \times K_{g_{pf}}} - 1}}{0.55} \right)^{0.83} [m] \quad (\text{eq. 3.6})$$

Onde:

$U_{90\%_{ff-is}}$  - Tensão suportável ao choque atmosférico da cadeia de isoladores;

$K_a$  - Fator de altitude para a altura representativa para Portugal e que varia conforme o valor da tensão de contornamento

$K_{z_{ff}}$  - Fator de desvio da distribuição da tensão suportável a sobretensões de frente rápida;

$K_{g_{ff}}$  - Fator de intervalo para sobretensões de choque atmosférico para sobre tensões de frente rápida de valor  $K_{g_{ff}} = 0.74 + 0.26K_g$ , onde  $K_g$  é o fator de intervalo;

$K_{cs}$  - Fator estatístico de coordenação (representa o risco de falha do isolador) que toma o valor de 1,05.

$U_{e2\%_{sf}}$  - Sobretensão de frente lenta com 2% de probabilidade de ser ultrapassada;

$K_{z_{sf}}$  - Fator de desvio da distribuição da tensão suportável a sobretensões de frente rápida;

$K_{g_{sf}}$  - Fator de intervalo para sobretensões de manobra com  $K_{g_{sf}} = K_g$ ;

$U_s$  - Tensão simples;

$K_{z_{pf}}$  - Fator de desvio da distribuição da tensão suportável a sobretensões à frequência industrial;

$K_{g_{pf}}$  - É dada por  $1.35K_g - 0.35K_g^2$ ;

Todos os valores para os diferentes fatores e grandezas, bem como informações adicionais, podem ser encontrados na norma IEC50341-1. Existem também distâncias mínimas que devem

ser respeitadas, tanto dentro do vão como no apoio. No caso de condutores nus, estes devem manter entre si ao longo do vão uma distância  $D$  mínima, dada pela seguinte equação:

$$D = k \times (f + S_l)^{0.5} + D_{pp} \quad [m] \quad (\text{eq. 3.7})$$

Sendo:

$D$  - Distância mínima em metros;

$K$  - coeficiente do material, obtido a partir da tabela 5.4.3/PT2 da norma IEC50341-3-17;

$f$  - flecha do condutor em metros, à temperatura máxima de projeto (75°C) na ausência de vento;

$S$  - Comprimento do troço oscilante da cadeia de isoladores na direção perpendicular à linha, em metros;

Segundo a norma IEC50341-3-17, fora das zonas de gelo, a distância entre condutores pode ser reduzida em dois terços desde que a distância horizontal entre os planos verticais que passam através dos pontos de fixação seja não inferior a dois terços de  $D$ . No projeto de uma linha aérea é também necessário respeitar as distâncias mínimas ao solo, a edifícios, a estradas, a árvores e objetos diversos. As equações para os cálculos das mesmas encontram-se na norma IEC50341-3-17 e encontram-se resumidas na Tabela 3-1 [3] [20].

Tabela 3-1 - Distancias de segurança

Definição			Equação	Mínimo (metros)
Distância dos condutores ao solo			$D = 5m + D_{el}$	6
Distância dos condutores às árvores			$D = 2m + D_{el}$	2.5
Largura faixa de proteção.			-	25
Distância dos condutores aos edifícios	Linha sobre edifícios	Inclinação do telhado superior a 15° e resistente ao fogo	$D = 2m + D_{el}$	4
		Inclinação do telhado inferior a 15° e resistente ao fogo	$D = 4m + D_{el}$	
		Não resistente ao fogo	$D = 10m + D_{el}$	
	Linha adjacente a edifícios (horizontal)		$D = 2m + D_{el}$	3
Distâncias dos condutores a antenas, candeeiros de iluminação, sinalização publicitária, mastros de bandeira, etc			$D = 2m + D_{el}$	3

Distância dos condutores nos cruzamentos com estradas e caminhos-de-ferro não eletrificados	$D = 7m + D_{el}$	$7m + D_{el}$
Distância dos condutores nos cruzamentos com caminhos-de-ferro eletrificados	$D = 12m + D_{el}$	13.5
Distância entre duas linhas (energia e de telecomunicações)	$D = 1m + D_{el}$	2

### 3.3 - Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores em Suspensão

Os isoladores com cadeia de isoladores (CI) em suspensão, devido à sua forma de colocação, possuem liberdade para se movimentarem no espaço quando sujeitos a forças como o vento ou à variação de tração dos condutores. Este movimento pode ser de uma amplitude que tal, que leve a que a cadeia se aproxime de um modo perigoso aos apoios.

As situações de ângulos, ou mesmo de declive, verificadas ao longo da rede de energia, aumentam o perigo de aproximação das cadeias de isoladores aos apoios, pois mesmo sem vento e sem grandes variações de temperatura, as CI em suspensão tendem a encontrar-se numa posição inclinada em relação ao eixo vertical. O desvio transversal das CI é então resultante de um sistema de forças verticais e horizontais a que estas estão sujeitas:

As forças horizontais são [10]:

- I. A força resultante das trações nos diferentes vãos, devido a variação da temperatura;
- II. A força do vento sobre os condutores;
- III. A força do vento sobre a cadeia de isoladores;

As forças verticais são:

- IV. O peso dos condutores;
- V. O peso dos isoladores;

Na Figura 3.3 está representada uma CI em suspensão que sofreu um desvio transversal devido à força do vento.

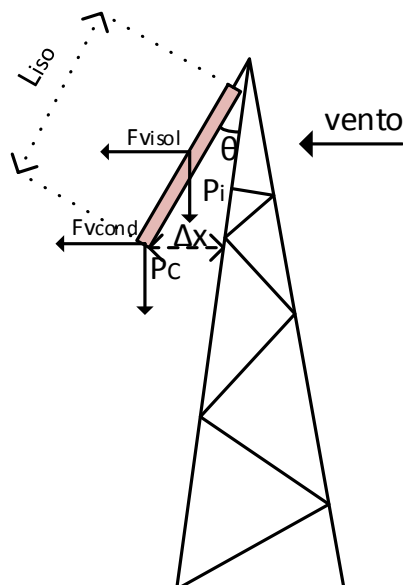


Figura 3-3 - Desvio transversal provocado pelo de uma cadeia em suspensão

Onde o retângulo a vermelho representa a cadeia de isoladores e sendo:

$L_{iso}$  - Comprimento da cadeia de isoladores em m;

$F_{v_{cond}}$  - Força do vento sobre os condutores em daN;

$F_{v_{isol}}$  - Força do vento sobre a cadeia de isoladores em daN;

$P_c$  - Peso dos condutores em daN;

$P_i$  - Peso da cadeia de isoladores em daN

Da Figura 3-3, resulta que [10]:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{F_{v_{cond}} + \frac{F_{v_{isol}}}{2}}{P_c + \frac{P_i}{2}} \right) \quad (\text{eq. 3.8})$$

De acordo com o artigo número 12 do R.S.L.E.A.T, a pressão dinâmica a considerar para o cálculo da força do vento é metade da pressão dinâmica do vento máximo habitual. O cálculo do deslocamento deve ser então realizado sempre tendo em conta o estado de Primavera de forma a se verificar a situação mais desfavorável, situação de vento máximo. Para o cálculo da tração de montagem foi sempre considerado então o estado mais desfavorável para o movimento da CI, ou seja o estado Primavera, e adotada uma temperatura de montagem de 20°C.

Através da análise da Figura 3.3, o deslocamento  $\Delta x$  é obtido através da seguinte equação:

$$\Delta x = L_{iso} \times \sin \theta \quad [m] \quad (\text{eq. 3.9})$$

O cálculo do peso dos condutores nem sempre é imediato. Enquanto, nos casos em que os apoios adjacentes se encontram no mesmo patamar este cálculo é simples, no caso de vãos em declive o mesmo não se verifica. Nestes casos, é necessário recorrer as equações (eq. 2.54), (eq. 2.56) e (eq. 2.58) consoante a posição do apoio em questão relativamente ao adjacente.

No desenvolvimento do trabalho, considerou-se um poste do tipo GAL<sup>1</sup>, com um braço de comprimento 1.5 metros e onde de acordo com a norma IEC50341-1 seria necessário respeitar uma distância de segurança de 0.7 metros. Em seguida segue-se um exemplo numérico do cálculo do desvio transversal de uma CI em suspensão.

- *Exemplo 3.1 - Cálculo do desvio transversal de uma CI em suspensão.*

Enunciado:

Considerando um cantão composto por dois vãos em patamar, L1 e L2, tal como ilustrado na Figura 2-7, com comprimentos de 300 metros e 400 metros calcular o desvio transversal máximo da cadeia de isoladores tendo em conta as seguintes características dos condutores:

Cabo Al-Aço		
Secção	215.5	mm <sup>2</sup>
Diâmetro	19.20	m
Peso Próprio	0.722	daN/m
Modulo Young E	8700	daN/m <sup>2</sup>
Coef. Dilatação. $\alpha$	$1.7 \cdot 10^{-5}$	C <sup>o</sup> -1
Tensão Rotura TR	6460	daN
Peso Isoladores	12	daN
Diâmetro Isoladores	300	mm
Comprimento Isoladores	3	m
L1	300	m
L2	400	m

Resolução:

O primeiro passo será calcular a força do vento, tanto no estado Primavera como no estado de Inverno através da equação (eq. 2.7), não esquecendo que a pressão dinâmica do vento máximo deve ser reduzida para metade.

$$F_{v1} = 0.6 \times 1 \times 36 \times 19.2 \times 10^{-3} = 0.414 \text{ daN/m}^2$$

$$F_{v2} = 0.6 \times 1 \times 90/2 \times 19.2 \times 10^{-3} = 0.518 \text{ daN/m}^2$$

Como o que interessa é obter o desvio máximo, irá ser utilizado o caso mais desfavorável, ou seja, o estado Primavera:

$$F_{v_{cond}} = \left( F_{v2} \times \frac{L1 + L2}{2} \right) = 181.44 \text{ daN}$$

$$F_{v_{isol}} = 0.6 \times 1 \times \frac{90}{2} \times 19.2 \times 10^{-3} \approx 16 \text{ daN}$$

---

<sup>1</sup> GAL - é um tipo de armação utilizada em redes elétricas aéreas, tem uma disposição em galhardete é utilizada em apoios com a função de alinhamento.



Posto isto, e tendo os isoladores um peso de 12 daN o peso dos condutores dado por:

$$P_c = \omega \times \frac{L1 + L2}{2} = 252.7 \text{ daN}$$

O descolamento angular da cadeia de isoladores é dado por:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{F_{v_{cond}} + \frac{F_{v_{isol}}}{2}}{P_c + \frac{P_{isol}}{2}} \right) [^\circ]$$

$$\theta = 36.21^\circ$$

$$\Delta x = Liso \times \sin \theta = 1.2 \times \sin 36.21 = 0.71 \text{ m}$$

Visto que a estrutura utilizada tem um comprimento do braço de 1,5 metro, não existe o risco de aproximação excessiva da cadeia de isoladores ao poste.

#### Fluxograma para o cálculo do desvio transversal da cadeia de isoladores em suspensão

A metodologia de cálculo para o desvio transversal de um cantão pode ser resumida no seguinte fluxograma:

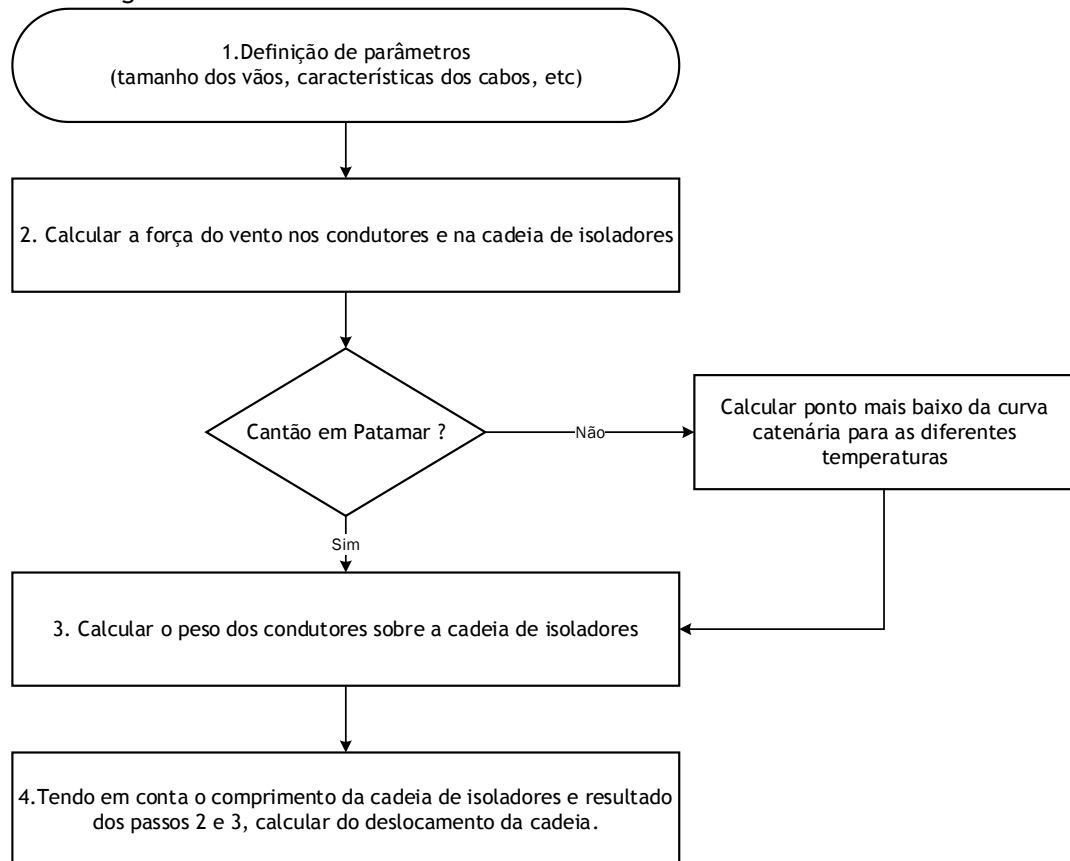


Figura 3-4 - Fluxograma para o cálculo do desvio transversal

### 3.4 - Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores em Suspensão

O deslocamento longitudinal dos apoios em suspensão não ocorre exclusivamente devido à ação do vento. Outro aspeto que leva a que este fenómeno se verifique em diversas ocasiões,

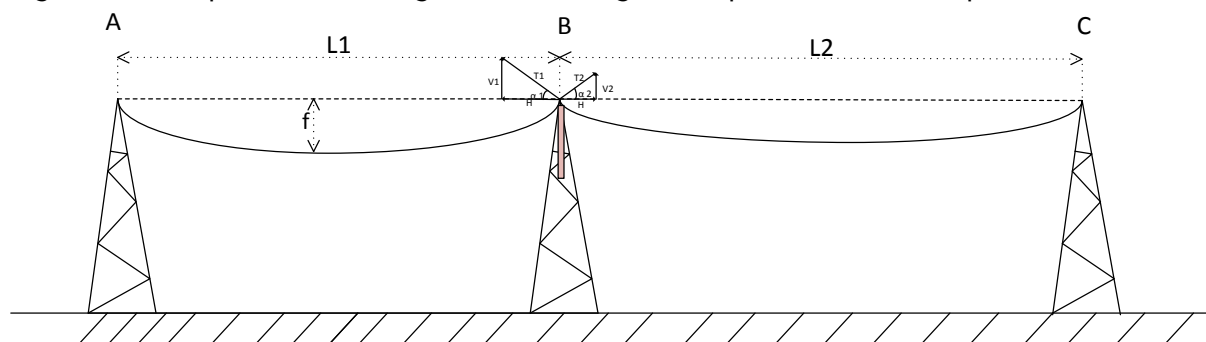
é o fato dos vãos adjacentes nem sempre possuírem o mesmo comprimento, o que provoca que, quando ocorram variações de temperatura em relação a temperatura de montagem, suficientes para levar a uma contração ou distensão dos condutores, a cadeia de isoladores se desloque longitudinalmente.

O deslocamento da cadeia de isoladores (CI) segundo uma direção longitudinal, leva a que existam forças com componentes não apenas verticais sobre o apoio e para as quais este não foi projetado. Estas forças fazem com o que o apoio esteja sujeito a solicitações que podem levar a uma inclinação deste, e em situações limite, que seja derrubado. Nos projetos de engenharia é usual admitir, como regra empírica, que os esforços sobre os apoios ultrapassem em cerca de 5% daqueles para o qual ele foi projetado de forma a permitir que ocorram pequenos deslocamentos da cadeia de isoladores. O deslocamento máximo depende então do comprimento da cadeia, nestes exemplos foi calculado para 5% e 10% do comprimento da cadeia para a situação de patamar para apenas para 10% para a situação de declive.

- *Exemplo 3.2 - Cálculo do desvio longitudinal de uma CI em suspensão.*

Enunciado:

Seguindo o exemplo 3.1 calcular agora o desvio longitudinal para diferentes temperaturas.



Resolução:

Para calcular o desvio longitudinal é necessário voltar a realizar todos os passos do *exercício 3.1* pois, para o cálculo do desvio longitudinal, a pressão dinâmica do vento não deve ser reduzida para metade. Calculando então a força do vento para os estados Primavera e Inverno através da equação (eq. 2.7):

$$F_v = q_h \times G_q \times G_x \times C_x \times A$$

$$F_{v1} = 0.6 \times 1 \times 36 \times 19.2 \times 10^{-3} = 0.415 \text{ daN/m}^2$$

$$F_{v2} = 0.6 \times 1 \times 90 \times 19.2 \times 10^{-3} = 1.037 \text{ daN/m}^2$$

Em seguida é necessário determinar os coeficientes de sobrecarga para os diferentes estados atmosféricos, seguindo a equação (eq. 2.13).

$$m = \frac{\sqrt{(\omega_v \times \sigma + \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2])^2 + F_v^2}}{\omega_v \times \sigma}$$

$$m_1 = \frac{\sqrt{(0.722)^2 + 0.415^2}}{0.722} = 1.153$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0.722)^2 + 1.037^2}}{0.722} = 1.750$$

Tendo os coeficientes calculados, ao contrário do que acontece com o desvio transversal, é necessário determinar, tanto o vão crítico como vão equivalente de forma a definir o estado mais desfavorável. Para tal, visto ser um cantão em patamar vão ser utilizadas as equações (eq. 2.15) e (eq. 2.16) para o  $L_{cr}$  e  $L_{eq}$  Respetivamente.

$$L_{cr} = \frac{\sigma \times t}{\omega} \times \sqrt{\frac{(\theta_k - \theta_j) \times 24 \times \alpha}{(m_k^2 - m_j^2)}} [m]$$

$$L_{cr} = \frac{215.5 \times 11.99}{0.722} \times \sqrt{\frac{(15 - (-5)) \times 24 \times 1.7 \times 10^{-3}}{(1.750^2 - 1.153^2)}} = 245.627 \text{ m}$$

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{300^3 + 400^3}{650}} = 360.555 \text{ m}$$

Analisando a árvore de decisão da Figura 2-2 o estado mais desfavorável é a Primavera, logo vai ser calculada a tração de montagem para uma temperatura de 20°C com coeficiente de sobrecarga unitário.

$$\theta_k + \frac{t_k}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} = \theta_j + \frac{t_j}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2}$$

$$20 + \frac{t_m}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1 \times 360.555^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times t_m^2} = 15 + \frac{11.99}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1.750^2 \times 360.555^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times 11.99^2}$$

$$t_m = 8.082 \text{ daN/mm}^2$$

Considerando então a tração de montagem igual a  $8.082 \text{ daN/mm}^2$  para uma temperatura de 20°C, é necessário analisar o que acontece quando a temperatura varia. Para tal, é preciso analisar os vãos como sendo vãos independentes. Admitindo então agora uma temperatura igual -5°C e desprezando o fator de sobrecarga, ou seja apenas tendo em conta a variação da temperatura ignorando os outros agentes atmosféricos como o vento e o gelo, calcula-se a tração de montagem para o vão L1 e L2 separadamente, através da equação dos estados deduzida na secção 2.3. No caso do vão AB de comprimento 300 metros:

$$\theta_k + \frac{t_k}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} = \theta_j + \frac{t_j}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2}$$

$$-5 + \frac{t_{mL1}}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1^2 \times 300^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times t_{mL1}^2} = 20 + \frac{8.081}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1^2 \times 300^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times 8.081^2}$$

$$t_{mAB} = 9.905 \text{ daN/mm}^2$$

Para as diferentes temperaturas, obtém-se as seguintes trações:

Vão AB	
Temperatura	$t_{mAB}$
[°C]	[daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	9.905
0	9.495
10	8.744
20	8.082
30	7.502
40	6.997
50	6.557
60	6.172
70	5.835
80	5.539

De forma análoga, no caso do vão BC de comprimento 400 metros:

$$\theta_k + \frac{t_k}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} = \theta_j + \frac{t_j}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2}$$

$$-5 + \frac{t_{mL2}}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1^2 \times 400^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times t_{mL2}^2} = 20 + \frac{8.081}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1^2 \times 400^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times 8.081^2}$$

$$t_{mBC} = 9.315 \text{ daN/mm}^2$$

Para as diferentes temperaturas, obtém-se as seguintes tensões mecânicas:

Vão BC	
Temperatura	$t_{mBC}$
[°C]	[daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	9,315
0	9,040
10	8,534
20	8,082
30	7,678
40	7,317
50	6,992
60	6,700
70	6,436
80	6,196

Considerando como positiva a direção da tração mecânica do vão 2, a tração resultante é dada por:

$$t_{res} = t_{m_{BC}} - t_{m_{AB}} \quad [daN/mm^2]$$

$$t_{res} = -0.590 \, daN/mm^2$$

Temperatura [°]	$t_{res}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	-1.857
0	-0.455
10	-0.2107
20	0
30	0.176
40	0.320
50	0.436
60	0.528
70	0.601
80	0.658

O facto das trações resultantes serem diferentes de zero, com exceção da tração para 20° que é a temperatura de montagem, é explicado pela diferença de comprimento dos vãos, o que leva a que estes reajam de forma diferente à variação da temperatura. No desvio longitudinal, a força do vento é desprezada, pois o que interessa é analisar o comportamento da cadeia quando se verifica uma variação de temperatura. Ou seja, a tração resultante vai ser a única força atuante num plano horizontal, sendo que segundo o eixo vertical é necessário ter em conta o peso dos condutores e dos isoladores.

Posto, isto e tendo os isoladores um peso de 12 daN o peso dos condutores dado por:

$$P_c = \omega \times \frac{L1 + L2}{2} = 252.7 \quad [daN]$$

O descolamento angular da cadeia de isoladores é dado por [21]:

$$\theta_{-5^\circ C} = \tan^{-1} \left( \frac{t_{res}}{P_c + \frac{P_{isol}}{2}} \right) \quad [^\circ]$$

$$\theta_{-5^\circ C} = 26.18^\circ$$

Temperatura [°C]	$\theta$ [°]
-5	-26.180
0	-20.777
10	-9.940
20	0.000
30	8.334
40	14.918
50	19.953
60	23.746
70	26.589
80	28.718

Através da equação (eq. 3.9) é possível calcular o deslocamento  $\Delta x$  da cadeia de isoladores:

$$\Delta x_{-5^\circ} = L_{iso} \times \sin \theta = -0.916 \text{ m}$$

Temperatura [°C]	$\Delta x$ [m]
-5	-0.529
0	-0.426
10	-0.207
20	0.000
30	0.174
40	0.309
50	0.409
60	0.483
70	0.537
80	0.577

Como era de esperar para uma temperatura de 20°C o deslocamento é nulo, pois, como é a temperatura de montagem, a CI foi colocada numa posição vertical (equilíbrio) na altura da montagem inicial. Quando a temperatura varia, a CI desloca-se no sentido do vão mais pequeno, no caso de a variação ser negativa, ou, caso a variação seja positiva, desloca-se no sentido do vão de maior comprimento. Admitindo uma tolerância de 10%, e visto a cadeia ter um comprimento de 1,2 metros, verifica-se que esta situação não é viável, no que ao desvio longitudinal diz respeito.

Fluxograma para o cálculo do desvio longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão

A metodologia geral de cálculo do desvio longitudinal pode ser traduzida no seguinte fluxograma:

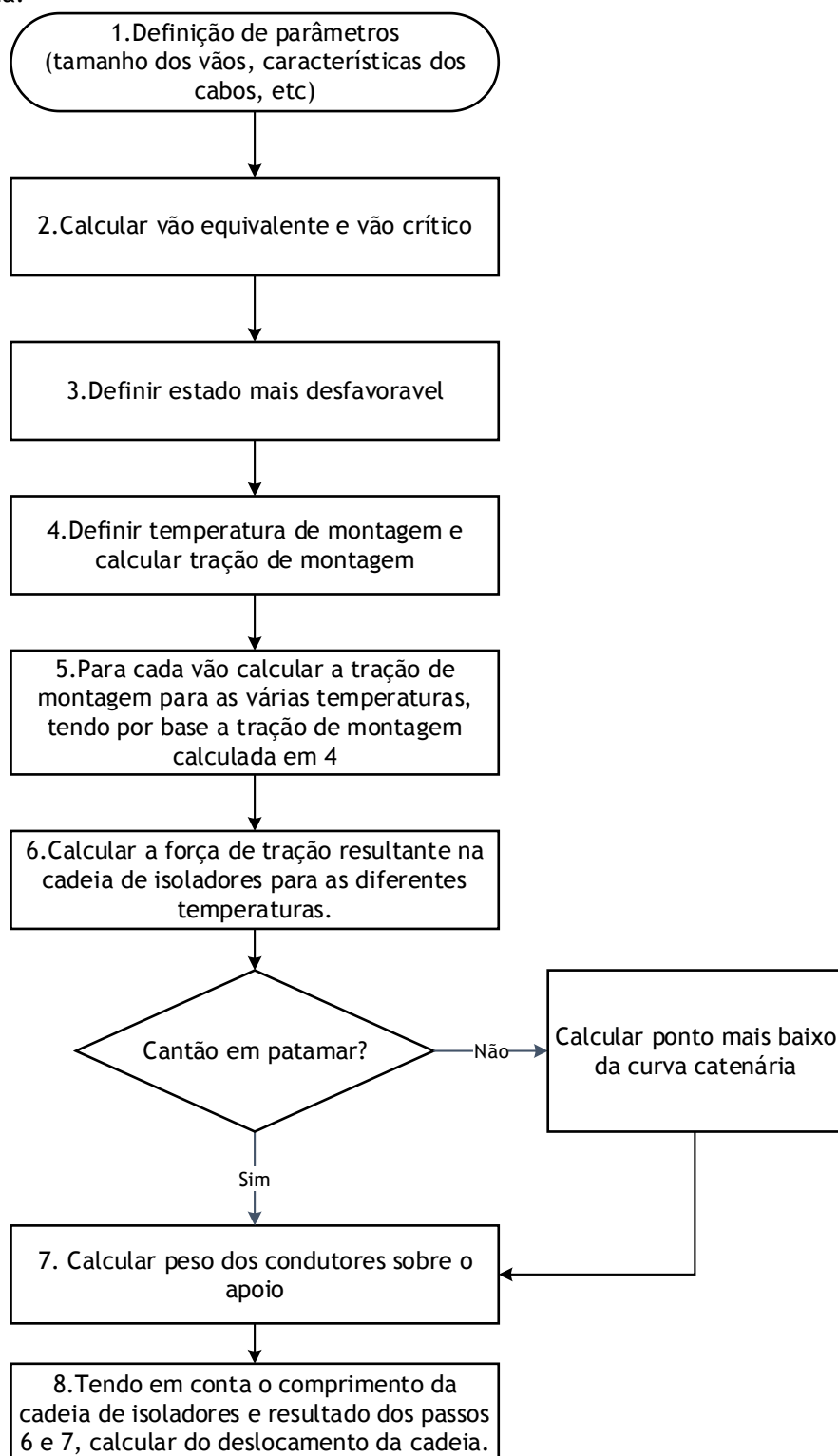


Figura 3-5 - Fluxograma para o cálculo do desvio longitudinal.

### 3.5 - Cantão com um apoio em suspensão em Patamar

Na situação de vãos em patamar, todos os apoios do cantão encontram-se ao mesmo nível, podendo ter ou não o mesmo comprimento. O principal objetivo com este estudo é determinar, até que ponto é que os vãos poderão possuir comprimentos diferentes, ou seja, qual a diferença máxima de comprimento entre estes, sem que se viole os limites de segurança para o desvio da cadeia de isoladores (CI). O cabo condutor utilizado e a cadeia de isoladores foram os mesmos que foram utilizados no exercício 3.1. O comprimento do braço é de 1.5 metros.

#### Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores

Nas situações de vão em patamar, a questão que se coloca é qual a diferença máxima de comprimento dos vãos adjacentes num cantão, para que possa ser possível aplicar cadeias em suspensão. A metodologia de cálculo utilizada para este estudo é a que está representada no fluxograma da Figura 3-4, onde, para se melhor compreender o movimento da CI, foi repetida diversas vezes para diferentes comprimentos dos vãos. Na tabela seguinte encontram-se os resultados da análise para a situação de vão em patamar:

Tabela 3-2 - Resultados da análise do desvio transversal para um cantão em patamar com um apoio em suspensão

Vão 1	Vão 2	%	$F_{v_{cond}}$	Pc	$\Theta$	$\Delta x$	Distancia	Viabilidade
[m]	[m]		[daN]	[daN]	[°]	[m]	[m]	
300	400	25	181.44	252.7	35.590	0.698	0.802	SIM
120	130	7.69	64.80	90.3	35.450	0.696	0.804	SIM
120	150	20	69.98	97.5	35.465	0.696	0.804	SIM
120	250	52	95.90	133.6	35.518	0.697	0.803	SIM
250	120	52	95.90	133.6	35.518	0.697	0.803	SIM
300	300	0	155.52	216.6	35.577	0.698	0.802	SIM
300	600	50	233.28	324.9	35.609	0.699	0.801	SIM
500	100	80	155.52	216.6	36.301	0.710	0.790	SIM
500	900	44.44	362.88	505.4	35.634	0.699	0.801	SIM
800	800	0	414.72	577.6	35.639	0.699	0.801	SIM
800	100	87.50	233.28	324.9	35.609	0.699	0.801	SIM
800	1000	20	466.56	649.8	35.643	0.699	0.801	SIM
900	1200	25	544.32	758.1	35.648	0.699	0.801	SIM
900	1300	30.77	622.08	866.4	35.838	0.703	0.797	SIM

#### Desvio Longitudinal da cadeia de isoladores

Analisando os resultados presentes no Anexo C, verifica-se que a diferença de comprimento entre vãos (em percentagem) varia com o tamanho do vão mais pequeno e conforme o



percentagem do comprimento da cadeia de isoladores que se quer admitir como tolerável. Para 10% de tolerância, a diferença de comprimento entre vãos admitida é superior aos obtidos para 5%. Visto tratar-se de uma rede média tensão no exemplo adotado, admitem-se cadeias de comprimento 0.6 metros e 1.2 metros.

Para uma tolerância de 10% é possível concluir que para vãos pequenos o limite para a diferença de comprimento é inferior a 10%, aumentando de forma exponencial para vãos maiores, onde ultrapassa os 50%. O fato de se variar o comprimento da cadeia de isoladores não influencia os valores limites pois, como o deslocamento da cadeia é calculado com base no comprimento da cadeia, como se pode verificar na equação (eq. 3.9). Para uma tolerância de 5%, o limite só ultrapassa a barreira dos 10% quando vão mais pequeno tem um comprimento de cerca de 600 metros, e o limite máximo ronda os 30%.

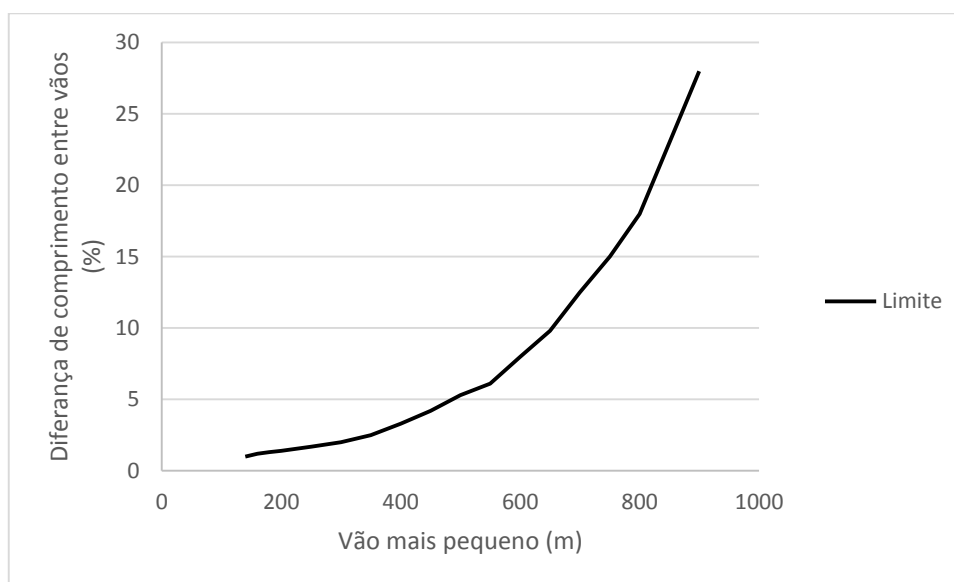


Figura 3-6 - Diferença de comprimento máxima entre vãos para a aplicação de cadeias em suspensão, com tolerância de movimento de 5% do comprimento da cadeia de isoladores.

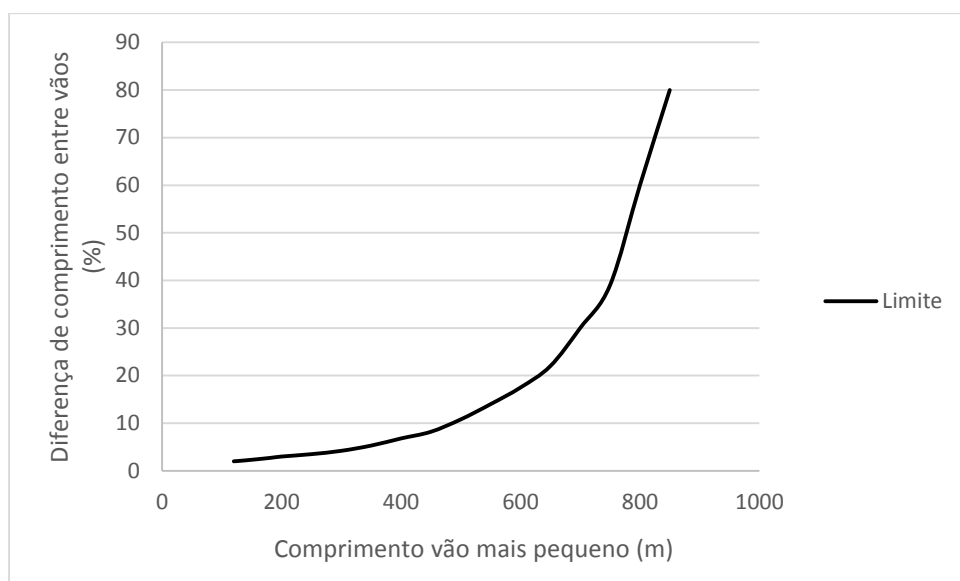


Figura 3-7 - Diferença de comprimento máxima entre vãos para a aplicação de cadeias em suspensão, com tolerância de movimento de 10% do comprimento da cadeia de isoladores

Para vãos pequenos, quando a temperatura altera, a tração vai variar bastante. No caso de a temperatura diminuir, as trações nos vãos mais pequenos aumentam consideravelmente e caso a temperatura aumente, verifica-se o inverso. Em vãos de tamanho elevado, a variação da tração com a temperatura não é tão significativa. No caso dos vãos de comprimento elevado é necessário relembrar que quanto maior o vão, mais elevada será a sua flecha, logo maior irá ter de ser o apoio. Quanto mais elevado o apoio for, maior é o seu preço, por isso nem sempre é favorável a utilização de vãos muito compridos nas linhas.

### 3.6 - Cantão com um apoio em suspensão e em Declive

Na análise dos vãos em declive dentro de um cantão, é necessário notar que existem oito situações diferentes, passíveis de análise. Em qualquer uma destas, é sempre necessário ter em conta a análise efetuada anteriormente para o caso de vão em patamar. Ao contrário do que acontecia nas situações de patamar, quando a temperatura variar de forma a influenciar as trações dos condutores, o ponto mais baixo das curvas catenárias vai se deslocar no espaço.

A determinação da coordenadas do ponto mais baixo da curva catenária é importante para o projeto de linhas aéreas, pois como foi possível ver na secção 2.10, a localização deste tem influência na força (“peso”) que os apoios vão ter de suportar. Por outro lado, quanto mais elevado o peso sobre o apoio for, maior será a dificuldade da cadeia de isoladores (CI) em se movimentar. Posto isto, em todas as situações foi calculado o ponto mais baixo da catenária para as temperaturas de  $-5^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  (temperatura de montagem) e  $80^{\circ}$ . O cabo condutor utilizado e a cadeia de isoladores foram os mesmos que foram utilizados no exercício 3.1. O comprimento do braço é de 1.5 metros.

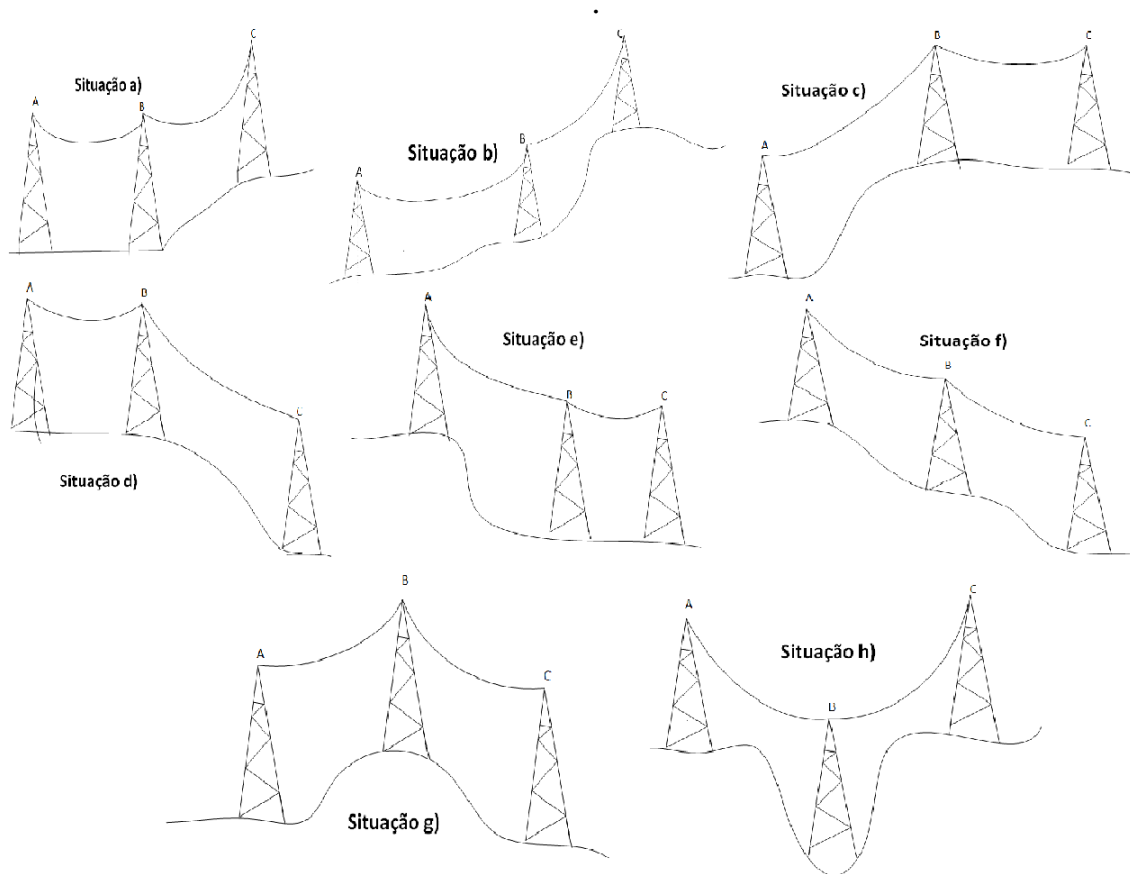


Figura 3-8 - Situações possíveis de se verificar num cantão em declive.

#### Situação a)

Como se pode observar na Figura 3-8, nesta situação, os apoios A e B encontram-se no mesmo patamar, sendo que o apoio C se encontra num nível superior a estes. Esta é uma situação bastante crítica para o movimento da cadeia de isoladores pois, o apoio C devido a sua posição elevada, exerce uma força sobre a cadeia mais pequena do que exerceria caso estivesse em patamar, podendo até, na eventualidade do ponto mais baixo da catenária encontrar-se à esquerda do apoio B, exercer uma força com sentido ascendente. Esta situação resulta em valores mais reduzidos para o peso sobre a cadeia de isoladores, o que facilita a sua deslocação. Visto o apoio A estar ao mesmo nível do apoio B, a sua capacidade para “compensar” a falta de peso devido à elevação do peso C é reduzida. Ou seja comparando com a situação de patamar, esta situação é mais desfavorável.

No desvio transversal, ao contrário do que acontecia na situação de patamar, já existem situações críticas que levam a que não sejam asseguradas as distâncias de segurança. Isto acontece essencialmente quando o declive de BC é elevado, ou quando o comprimento de vão AB é bastante inferior ao vão BC. O declive aceitável para o vão BC aumenta à medida que o comprimento do vão mais pequeno aumenta, tal como é possível verificar na Tabela D-1.

No que toca ao desvio longitudinal é possível concluir que este aumenta, quando comparado com a situação de patamar. Isto sucede-se devido ao menor peso existente sobre a cadeia de isoladores. Com a variação de temperatura o peso sobre o apoio B também vai variar, visto que o ponto mais baixo da catenária vai se deslocar. Para uma variação de temperatura negativa o peso vai diminuir, aumentando assim em valor absoluto o deslocamento da cadeia. Para um aumento de temperatura, como as trações vão diminuir, o peso sobre a cadeia aumenta, dificultando assim o seu movimento. Para a temperatura de montagem (20°), o deslocamento é nulo. A diferença máxima de comprimento admissível entre os dois vãos, quando comparado com a situação de patamar, é menor. Os resultados encontram-se na Tabela D-9.

#### Situação b)

A situação b) encontra-se ilustrada na Figura 3-8, onde se observa que o cantão na sua totalidade, encontra-se em declive. Esta distribuição dos apoios provoca sobre a cadeia de isoladores dois tipos de forças distintas, um aumento do peso (quando comparado com a situação de patamar) sobre a cadeia, provocada pelo vão AB, e uma diminuição do peso à semelhança da situação a), provocada pelo vão BC. Sendo assim, o caso mais desfavorável é quando a força provocada pelo vão BC tem sentido ascendente (devido ao declive acentuado) e quando declive do vão AB é reduzido, de onde resulta que a força sobre apoio nesse caso é dada por:

$$VB = VAB - VBC = [(L1 - LOab) - LObc] \times \omega \quad [daN] \quad (eq. 3.10)$$

Como se pode deduzir da equação (eq. 3.10) e pela Figura 2-8, quanto mais elevado for o declive entre o apoio A e o apoio B, menor será o valor de LOab, o que é benéfico para evitar que a cadeia fique virada ao contrário. Quanto mais elevado for o declive entre o apoio B e o apoio C, mais reduzido será o peso sobre a cadeia, mais facilmente se movimentará a cadeia de isoladores.

No que respeita ao desvio transversal da CI, é possível concluir a partir da Tabela D-2, que quando o declive do vão AB é superior ao declive do vão BC, esta situação deixa de ser crítica, pois na maioria dos casos, a componente descendente é superior à componente ascendente, resultando num peso elevado sobre a cadeia. Comparando com a situação anterior, esta disposição dos apoios é bastante mais favorável para evitar o movimento da cadeia de isoladores.

À semelhança do que acontecia no desvio transversal, a viabilidade ou não desta situação relativamente ao movimento longitudinal da CI, vai depender dos declives dos vãos que formam o cantão. Com isto, quanto maior for o declive do vão AB, e quanto menor for o declive do vão BC melhor. Nas situações em que o declive de AB for superior a BC, é possível (em quase todos os casos), que a diferença de comprimento entre os dois vãos seja maior do que o limite estabelecido para a situação de patamar. Apesar de poder ser aumentado, o seu valor nunca

poderá ser muito distante, ou seja o aumento permitido é pequeno. Nos casos em que o declive de BC seja superior, a diferença máxima de comprimento diminui sendo em muitos casos inviável. O estudo deste comportamento encontra-se na Tabela D-10.

#### Situação c)

Neste caso, o apoio A encontra-se num patamar inferior aos apoios B e C, sendo que estes dois últimos estão ao mesmo nível. Visto que o apoio A exercerá um peso elevado sobre a CI, dificultando assim o movimento destes, nunca irão ocorrer situações críticas, no que toca ao desvio transversal da CI. Nesta situação, quanto maior for declive do vão AB melhor, pois maior será o peso sobre a CI.

Relativamente ao movimento longitudinal da CI, á semelhança do anterior, o movimento da CI será mais reduzido, quando comparado com a situação de patamar. Como o peso sobre a CI é mais elevado, a diferença máxima de comprimentos permitida entre vãos é superior á situação de patamar, e aumenta conforme o declive, pois quanto mais elevado este for, maior será diferença de comprimento admissível. Apesar de poder ser aumentada, este incremento nunca poderá ser muito elevado. Esta disposição é bastante favorável a aplicação de CI em suspensão. Os resultados do estudo do movimento transversal e longitudinal encontram-se nas Tabelas D-3 e D-11 respetivamente.

#### Situação d)

Situação análoga à situação c), embora neste caso o apoio que se encontra numa posição inferior seja o apoio C, sendo que os apoios A e B estão ao mesmo nível. Á semelhança do caso anterior, não existe o risco de uma aproximação dos condutores ao apoio (desvio transversal), pois o apoio C, como está a um patamar inferior, exerce sobre a CI um peso elevado, dificultando assim o movimento da mesma. Relativamente ao movimento da CI segundo uma direção longitudinal, as conclusões e resultados são em tudo semelhantes á situação c). Os resultados para o desvio transversal e longitudinal encontram-se nas Tabelas D-4 e D-12 respetivamente e a sua representação na Figura 3-8.

#### Situação e)

Situação semelhante à situação a), embora neste caso seja o apoio A que se encontra num perfil sobrelevado em relação aos restantes. É uma situação problemática para o desvio da CI, pois, como é possível ver nas Tabelas D-5 e D-13, o peso dos condutores sobre a CI diminui com o aumento do declive. Esta diminuição do peso, leva a que quando, a CI esteja sujeita á força

do vento (desvio transversal) ou a variações de temperatura (desvio longitudinal), esta se desloque mais facilmente.

#### Situação f)

Caso semelhante à situação c), onde ambos os vãos, AB e BC encontram-se em declive. À semelhança da situação 2, quando maior for o declive do vão BC, melhor, pois mais elevado será o peso sobre a cadeia de isoladores, dificultando assim o seu movimento. No que respeita ao vão AB, verifica-se o contrário, quanto maior o declive pior para o movimento da CI pois o peso sobre a esta diminuirá em comparação com a situação de patamar. As conclusões acerca do desvio longitudinal e o desvio transversal, são iguais às retiradas para a situação 2, e podem ser confirmadas através das Tabelas D-6 e D-14.

#### Situação g)

Na Figura 3-8, nesta situação os apoios que se encontram em amarração, apoios A e B, estão localizados num patamar inferior ao apoio de suspensão, apoio C. Esta disposição é ideal para evitar o movimento da cadeia de isoladores, visto os apoios A e C estarem abaixo de B, os vãos AB e BC irão exercer um peso elevado na cadeia, dificultando o movimento da CI. Como se pode observar na Tabela D-7, o movimento transversal da CI não constitui uma preocupação a ter nestas ocasiões. No que respeita ao movimento longitudinal, como se pode observar na Tabela D-15, os valores obtidos para o desvio longitudinal são bastantes inferiores quando comparados com os da situação de patamar. Com isso conclui-se que é possível aumentar a diferença de comprimento máxima entre os vãos, apesar de este aumento nunca poder ser muito significativo em relação ao limite estabelecido para a situação em patamar. Por fim, esta disposição pode ser considerada como a ideal para a aplicação de CI em suspensão.

#### Situação h)

A situação h) aqui presente pode ser também denominada situação de enforcamento. Neste caso os apoios A e C estão num patamar superior ao apoio B, levando a que, caso o patamar seja suficientemente elevado, sejam exercidas forças ascendentes sobre a CI, levando a que em situações limites, o peso que esta tem de suportar tenha apenas componente ascendente.

$$VB = -(VAB + VBC) \text{ [daN]} \quad (\text{eq. 3.11})$$

Esta disposição proíbe qualquer aplicação de CI em suspensão no apoio intermédio a não ser que os declives sejam bastante reduzidos, pois como se pode verificar nas Tabelas D-8 e D-16, o desvio longitudinal e transversal assumem, na maior parte dos casos, valores que tornam inviável a sua utilização.

### 3.7 - Cantão com um apoio em suspensão e estrutura em Ângulo

Nas estruturas em ângulo de uma rede de distribuição ó desvio transversal e o desvio longitudinal são analisados de forma conjunta. O vento por sua vez, considera-se, como atuando na direção da bissetriz do ângulo interno entre os dois vãos ou no sentido oposto, conforme o isolador da estrutura que se esteja a analisar. Caso a CI em análise esteja na parte interior do ângulo entre as linhas, considera-se o sentido oposto, pois assim, o vento irá provocar uma força que leva a aproximação da cadeia de isoladores ao poste. No caso do apoio exterior, considera-se o vento na direção da bissetriz do ângulo interior.

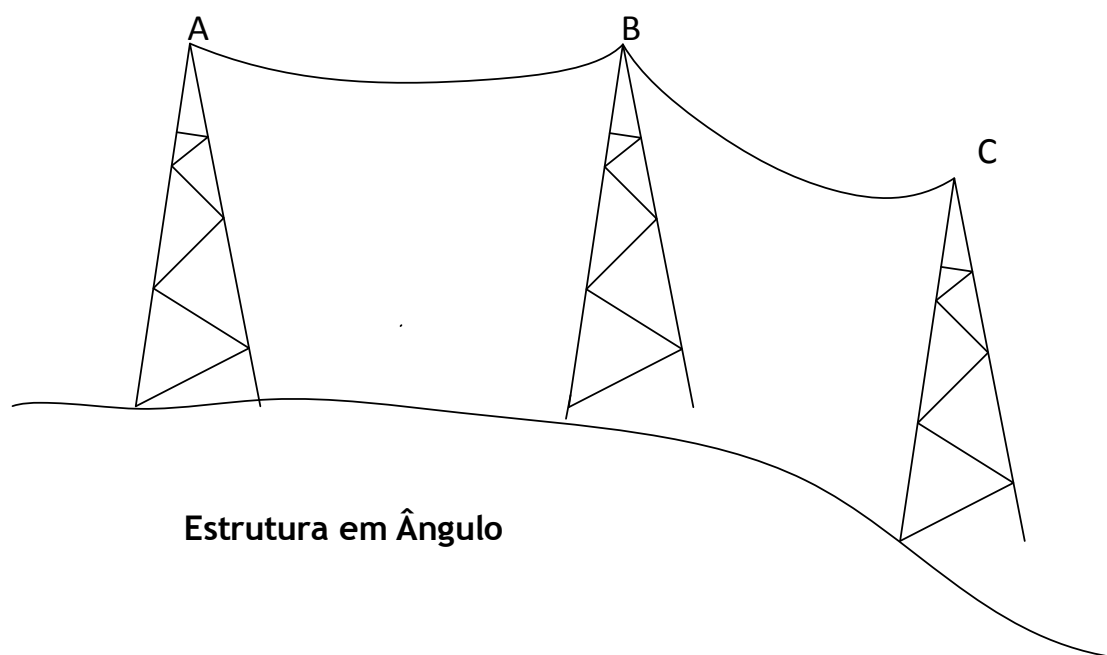


Figura 3-9 - Cantão com um apoio em suspensão e estrutura em ângulo.

De forma a facilitar segue-se a figura 3-10, onde está construído o mesmo cantão da figura 3-9, mas numa visão superior.

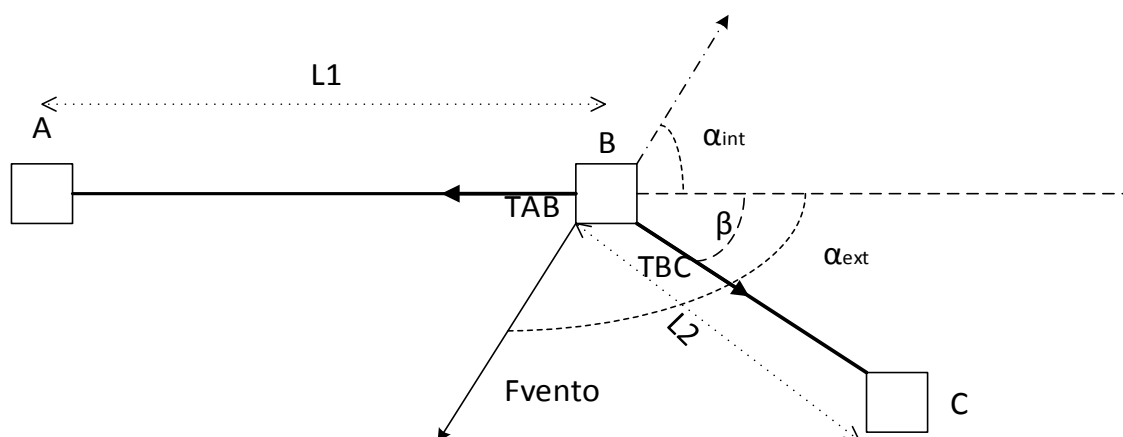


Figura 3-10 - Cantão com um apoio em suspensão e estrutura em ângulo, numa visão superior.

A Figura 3-10 mostra que, a tração resultante vai depender do comprimento dos vãos e do ângulo entre estes. De forma a simplificar a análise foi considerado que o vão L1 (AB) está sobre o eixo das abcissas, ou seja a componente da tração sobre o eixo das ordenadas é nula. A tração TBC terá componente segundo ambos os eixos, sendo esta facilmente decomposta através das seguintes equações:

$$F_{x_{BC}} = TBC \times \cos \beta \text{ [daN/mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.12})$$

$$F_{y_{BC}} = TBC \times \sin \beta \text{ [daN/mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.13})$$

Onde  $F_{x_{BC}}$  e  $F_{y_{BC}}$  são as componentes segundo o eixo das abcissas e das ordenadas respetivamente da tração TBC. Assim, a força resultante da tração TAB e TBC, tendo em conta o ângulo  $\beta$ , é dada por:

$$F_{r_x} = TAB - TBC \times \cos \beta \text{ [daN/mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.14})$$

$$F_{r_y} = TBC \times \sin \beta \text{ [daN/mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.15})$$

$$F_{R_T} = \sqrt{F_{r_x}^2 + F_{r_y}^2} \text{ [daN/mm}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.16})$$

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{F_{r_x}}{F_{R_T}} \right) \quad (\text{eq. 3.17})$$

Sendo  $F_{R_T}$  a força resultante das trações TAB e TBC,  $\phi$  a sua direção e  $F_{r_x}$  e  $F_{r_y}$  as suas componentes segundo x e y respetivamente. No caso de serem iguais as trações TAB e TBC, a resultante terá a mesma direção da força do vento, ou seja, segundo a direção da bissetriz do ângulo interno. Aplicando agora o mesmo raciocínio à força do vento, vem que para o ângulo do vento segundo a bissetriz do ângulo entre os condutores é dado por:

$$\alpha_{ext} = -\frac{180 - \beta}{2} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (\text{eq. 3.18})$$

E caso a CI em análise ser a da parte interior do ângulo entre os vãos:

$$\alpha_{int} = 180 + \frac{180 - \beta}{2} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (\text{eq. 3.19})$$

Onde, como se pode observar na Figura 3-9,  $\alpha_{ext}$  é o ângulo da força do vento a considerar quando a CI em análise é a da parte exterior do apoio e  $\alpha_{int}$  quando é a CI da parte interior.



Tendo o sido efetuado o calculo do ângulo, é necessário calcular as componentes segundo o eixo das abcissas e das ordenadas conforme a ângulo calculado.

$$F_{x_{vento}} = (F_{v_{cond}} + F_{v_{isol}}) \times \cos \alpha \quad [daN] \quad (eq. 3.20)$$

$$F_{y_{vento}} = (F_{v_{cond}} + F_{v_{isol}}) \times \sin \alpha \quad [daN] \quad (eq. 3.21)$$

Sendo  $F_{x_{vento}}$  a componente segundo x da força do vento e  $F_{y_{vento}}$  a componente segundo y. Por fim, é necessário somar as componentes segundo x e y da força do vento e das trações de forma a obter a força e a sua direção que é aplicada na cadeia pela combinação das forças.

$$F_x = F_{x_{vento}} + F_{r_x} \times \sigma \quad [daN] \quad (eq. 3.22)$$

$$F_y = F_{y_{vento}} + F_{r_y} \times \sigma \quad [daN] \quad (eq. 3.23)$$

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad [daN] \quad (eq. 3.24)$$

$$\lambda = \cos^{-1} \left( \frac{F_x}{F_R} \right) \quad (eq. 3.25)$$

Sendo  $F_R$  a intensidade da força resultante da combinação da ação do vento e das trações dos condutores,  $F_x$  e  $F_y$ , as suas componentes segundo os eixos ortogonais e  $\lambda$  o ângulo da força aplicada á cadeia de isoladores em suspensão do apoio B. O movimento desta será calculado de forma semelhante ao que se verificava para o desvio transversal, ou seja:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{F_R}{P_c + \frac{P_l}{2}} \right) \quad [^\circ] \quad (eq. 3.26)$$

À semelhança do desvio transversal, para as estruturas em ângulo, a temperatura de montagem adotada será 20°, e o estado atmosférico usado será a Primavera, que corresponde ao estado de vento máximo, que é a pior situação. A pressão dinâmica do vento será também reduzida para metade, tal como indica o artigo 12° do Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T.) para o cálculo de distância dos condutores aos apoios. Em seguida segue-se um exemplo numérico do cálculo do desvio da CI numa situação de ângulo.

- *Exemplo 3.3 - Cálculo do movimento das CI em suspensão num cantão com estrutura em ângulo.*

Tendo em conta a Figura 3-9 e utilizando o mesmo cabo, comprimento de vãos, isoladores e armações do *exercício 3.1*, calcular, para o apoio exterior, o deslocamento das cadeias, tendo em conta a variação de temperatura (calcular para temperaturas de -5°C, 20°C e 80°C) e um ângulo  $\beta$  entre vãos de 11.459°. Do *exercício 3.1* vem que:

$$F_{v1} = 0.6 * 1 * 36/2 * 19.2 * 10^{-3} = 0.414 \text{ daN/m}^2$$

$$F_{v2} = 0.6 * 1 * 90/2 * 19.2 * 10^{-3} = 0.518 \text{ daN/m}^2$$

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{300^3 + 400^3}{650}} = 360.555 \text{ m}$$

Adotando a mesma temperatura de montagem, 20°C, vai ser o utilizado o estado de Primavera de forma a ser utilizado estado e vento máximo:

$$\theta_k + \frac{t_k}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} = \theta_j + \frac{t_j}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2}$$

$$20 + \frac{t_m}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1 \times 360.555^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times t_m^2}$$

$$= 15 + \frac{11.99}{8700 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{0.722^2 \times 1.750^2 \times 360.555^2}{24 \times 1.7 \times 10^{-3} \times 215.5^2 \times 11.99^2}$$

$$t_m = 10.485 \text{ daN/mm}^2$$

Considerando então a tração de montagem igual a  $10.485 \text{ daN/mm}^2$  para uma temperatura de  $20^\circ$ , é necessário analisar o que acontece quando a temperatura varia. Para tal, é preciso estudar os vãos como sendo vãos independentes. Considerando agora uma temperatura igual  $20^\circ$  e com coeficiente de sobrecarga unitário, ou seja apenas tendo em conta a variação da temperatura ignorando os outros agentes atmosféricos como o vento e o gelo, calcula-se a tração de montagem para o vão L1 e L2 separadamente, através da equação dos estados á semelhança do que foi realizado no exercício 3.2. Para o vão L1 resulta que:

Temperatura [°C]	$t_{mAB}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	$F_{xAB}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	$F_{yAB}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	13.014	13.014	0
20	10.485	10.485	0
80	6.625	6.625	0

Para o vão L2:

Temperatura [°C]	$t_{mBC}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	$F_{xAB}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	$F_{yAB}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	12.457	12.209	2.475
20	10.485	10.276	2.083
80	7.443	7.294	1.479

Considerando a tração de vão BC como sendo positiva segundo o eixo das abcissas e das ordenadas:

Temperatura [°C]	$F_{R_T}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	$F_{R_x}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	$F_{R_y}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	$\phi$ [°]
-5	2.603	-0.806	2.475	-108.032
20	2.094	-0.209	2.083	-95.730
80	1.623	0.670	1.479	-65.637

Considerando como sendo a força de vento máxima que atua sobre os condutores e isoladores:

$$F_v = \left( F_{v2} \times \frac{L1 + L2}{2} \right) + \frac{F_{v_{isol}}}{2} = \left( 0.518 \times \frac{300 + 400}{2} \right) + 8 = 189.44 \text{ daN}$$

Como em análise está o apoio exterior, é necessário calcular o ângulo da força do vento:

$$\alpha_{ext} = -\frac{180 - \beta}{2} = -95.730^\circ$$

Visto a força do vento não variar com a temperatura, o cálculo das suas componentes x e y só é necessário ser realizado uma vez. A direção do vento é a mesma da força resultante quando não há variação de temperatura.

$$F_{x_{vento}} = F_v \times \cos \alpha = 18.912 \text{ daN}$$

$$F_{y_{vento}} = F_v \times \sin \alpha = 188.494 \text{ daN}$$

Tendo em conta a equação (eq. 3.26), é possível calcular o desvio da cadeia de isoaldores.

Temperatura (°C)	$F_x$ (daN)	$F_y$ (daN)	$F_R$ (daN)	$\lambda$ (°)	Pc+Piso (daN)	$\Theta$ (°)	$\Delta x$ (m)
-5	192.528	721.811	747.046	-104.935	246.7	-70.489	1.131
20	63.954	637.406	640.606	-95.730	246.7	-67.549	1.109
80	-125.382	507.140	522.409	-76.113	246.7	-63.129	1.070

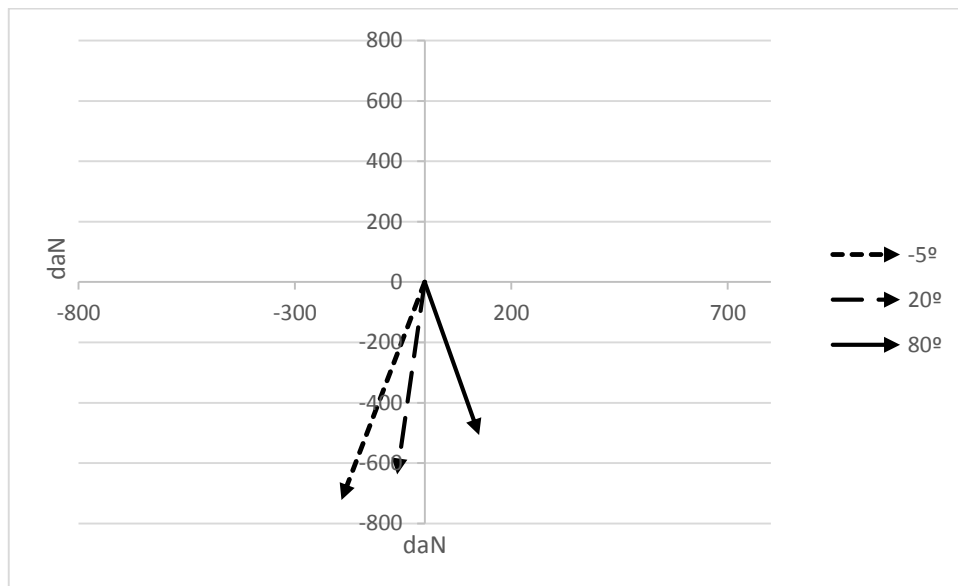


Figura 3-11 - Variação da direção da força resultante com a temperatura

Os resultados do exercício 3.3, ilustrados na Figura 3-10 e, juntamente com a Tabela E-1, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Para a temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , ou seja a temperatura de montagem, o ângulo da resultante é igual ao ângulo da força do vento pois, não variando a temperatura,

as trações nos dois vãos são iguais e a tração resultante delas tem a direção da bissetriz do ângulo interno.

- Para uma temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ , ou seja uma variação positiva de temperatura, a força resultante das duas trações vai sofrer um deslocamento no sentido do vão de comprimento superior, pois este possui uma melhor capacidade de adaptação à variação de temperatura. Para a temperatura igual a  $-5^{\circ}\text{C}$ , verifica-se o oposto.
- O facto de o cantão ter uma estrutura em ângulo, leva a que a intensidade da força resultante, quando comparada com a situação de alinhamento, sofra um aumento significativo. Este fenómeno é bastante crítico no dimensionamento de apoios.
- Como é possível verificar na Tabela E-1, segundo este método de cálculo, a colocação de apoios em ângulo com cadeias de isoladores em suspensão não é viável para esta armação. Uma possível solução, e provavelmente mais económica seria, aumentar o comprimento do braço nas situações de ângulo, ao invés de se alterar a armação ou o apoio. Esta questão será abordada no capítulo seguinte.

#### Fluxograma para o cálculo do desvio longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão

A metodologia geral de cálculo do deslocamento da cadeia de isoladores num cantão com estrutura em ângulo pode ser traduzida no seguinte fluxograma:

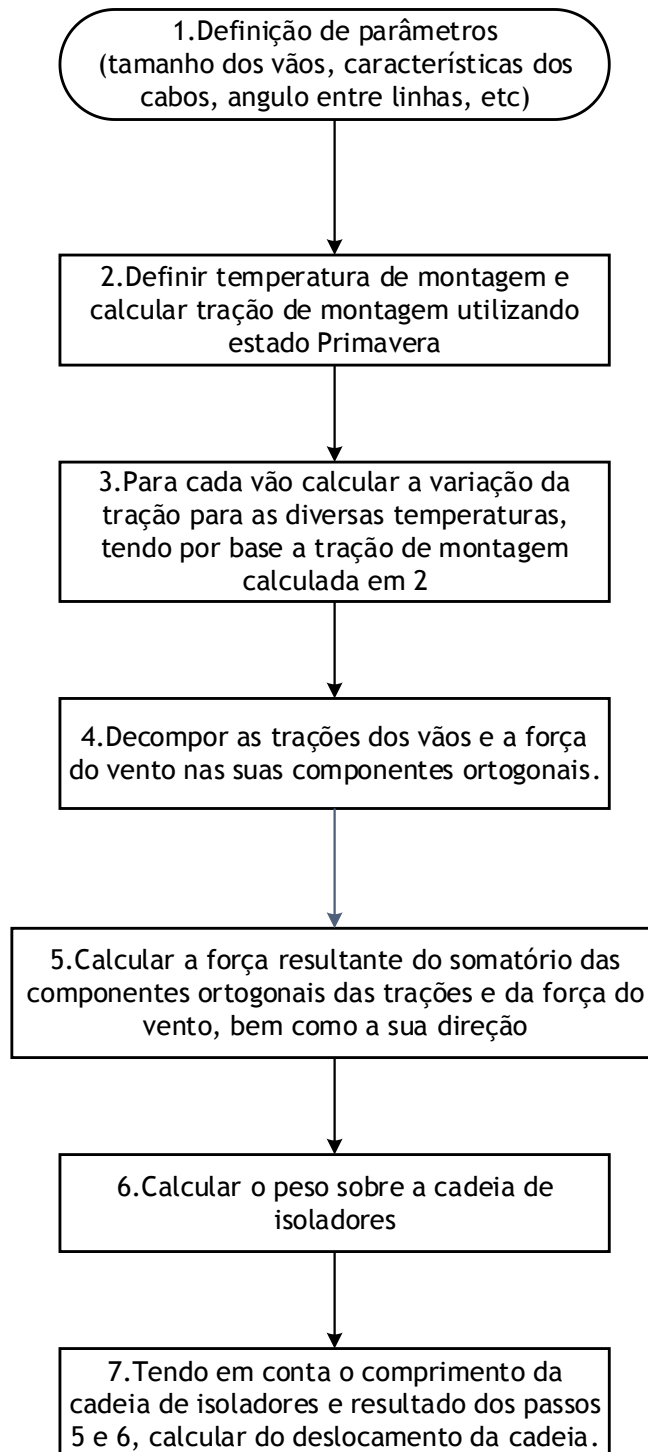


Figura 3-12 - Fluxograma para o cálculo do deslocamento da cadeia de isoladores num cantão com estrutura em ângulo.

## Capítulo 4

# Impactos Técnicos e Económicos na Alteração Apoios de Suspensão para Amarração: Caso de Estudo

O objetivo deste capítulo quarto é analisar o impacto da alteração da disposição dos apoios, tanto a nível de segurança dos componentes (correto dimensionamento do apoio e armação de forma a cumprir regras de segurança) como a nível económico. O caso de estudo consiste num cantão com um apoio em suspensão de uma linha de 30kV que se encontra em patamar e com os postes do cantão todos alinhados. É necessário deslocar um dos apoios do cantão, e então o objetivo com esta análise é saber se, no apoio que se encontra com a cadeia de isoladores (CI) em suspensão, a armação pode ser mantida, ou se é necessário mudar esta, ou até se é preciso mudar o apoio. Estas alterações nas linhas têm um custo económico no projeto relevante, razão pela qual será também analisada a vertente económica aliada as estas modificações. O objetivo, por fim será estabelecer um ângulo a partir do qual a armação ou o apoio têm de ser substituídos por razões de segurança, e determinar, de forma aproximada, variação do custo do projeto em função do ângulo entre os vãos.

### 4.1 - Apoio

Sendo os apoios os elementos das linhas elétricas que têm como função servir de suporte aos condutores, isoladores, cabos de guarda entre outros, m Portugal são utilizados essencialmente dois tipos de apoios, de betão ou metálicos. A escolha do qual o tipo de apoio a utilizar tem diversos critérios, como a localização, o orçamento disponível ou a disponibilidade do equipamento.

De acordo com o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T.) um apoio pode ter as seguintes funções [5]:

- Alinhamento

- Ângulo
- Derivação
- Fim de linha
- Reforço

Cada apoio é sujeito a diversas solicitações e tem de estar projetado para as aguentar. Existem solicitações sobre os três eixos (x,y,z). Sobre o eixo dos zz's destaca-se a força provocada pelos condutores e isoladores. Segundo os eixos xx's e yy's destacam-se a força do vento e no caso de ser um apoio de fim de linha, o esforço longitudinal (xx's), tal como ilustrado na Figura 4-1.

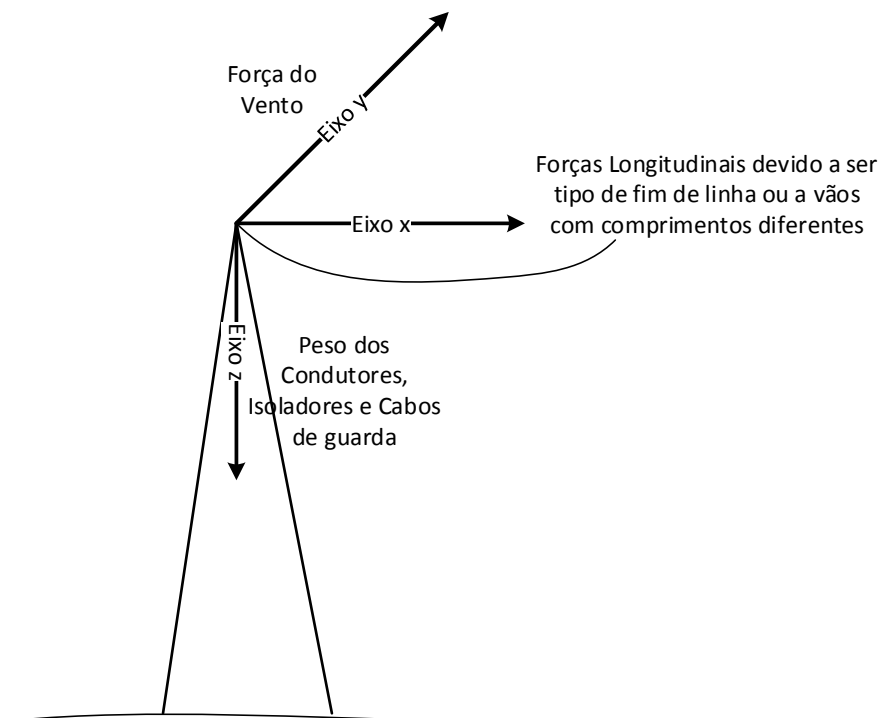


Figura 4-1 - Solicitações de um apoio.

Estas são as forças segundo as quais o apoio é calculado, mas como foi referido anteriormente, muitas vezes, quando se está na presença de apoios em suspensão em vãos desiguais, o apoio sofre uma força que o pode levar a inclinar de forma perigosa. Esta força é provocada pelo movimento longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão. No caso considerado, o apoio escolhido será em betão por ser o caso mais comum em Portugal e mais económico. O apoio será escolhido tendo em conta as solicitações a que vai estar sujeito, bem como a flecha e as distâncias de segurança que tem de garantir. Estes cálculos serão efetuados na secção 4.5.

## 4.2 - Armação

As armações são os objetos metálicos colocados no topo do apoio e que têm como função servir de suporte as cadeias de isoladores e condutores. A EDP Distribuição tem normalizado, de acordo com a norma DMA-C67-620/N, dez tipos de armações para as linhas de 30kV com postes de betão. No caso específico será utilizada uma armação do tipo GAL visto ser um caso de alinhamento com cadeia de suspensão. A armação GAL é caracterizada por uma disposição em galhardete tal como é possível verificar na figura seguinte:

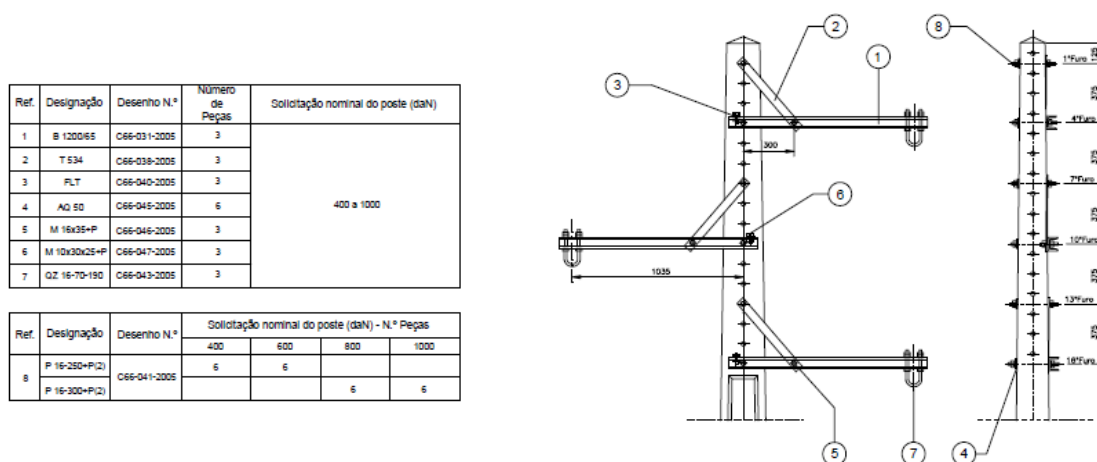


Figura 4-2 - Armação tipo GAL [22].

A armação adotada terá um comprimento de braço de 2.25 metros.

## 4.3 - Cabo

O cabo utilizado, visto ser uma linha de 30kV, será um cabo Al/Aço 325 30X3.35/7X3.35 com as seguintes características:



Tabela 4-1 - Características do cabo condutor

Caraterística	Valor	Unidade
Material	Alumino-Aço	
Secção	326	mm <sup>2</sup>
Diâmetro	23.45	mm
Peso Próprio	1.219	daN/m
Modulo Young E	7850	daN/mm <sup>2</sup>
Coef. Dilatação. $\alpha$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	C <sup>o</sup> -1
Tensão Ruptura TR	11270	daN

O cabo de guarda adotado, é o cabo da Cabelte OPGW AS/AA 32/113 ST 1x 24 F. As suas características são as seguintes:

Tabela 4-2 - Características do cabo de guarda [23].

Caraterística	Valor	Unidade
Material	Alumino-Aço	
Secção	144.8	mm <sup>2</sup>
Diâmetro	16	mm
Peso Próprio	0.546	daN/m
Modulo Young E	8367	daN/mm <sup>2</sup>
Coef. Dilatação. $\alpha$	$18 \cdot 10^{-6}$	C <sup>o</sup> -1
Tensão Ruptura TR	>7143	daN

## 4.4 - Isolador

Os isoladores têm como objetivo prevenir a passagem de corrente elétrica para elementos como os apoios. Nas redes elétricas aéreas de 30kV, os isoladores apresentam-se normalmente em cadeias de isoladores. De acordo com a norma IEC50341-3-17, os isoladores devem ter uma tração de ruptura mecânica, igual ao superior às dos condutores. Como tal, tendo por base o catálogo da empresa Cerisol, o isolador utilizado é o seguinte:

Tabela 4-3 - Características do Isoladores [24].

Isolador	
Tipo	U70BS
Linha de fuga	300 mm

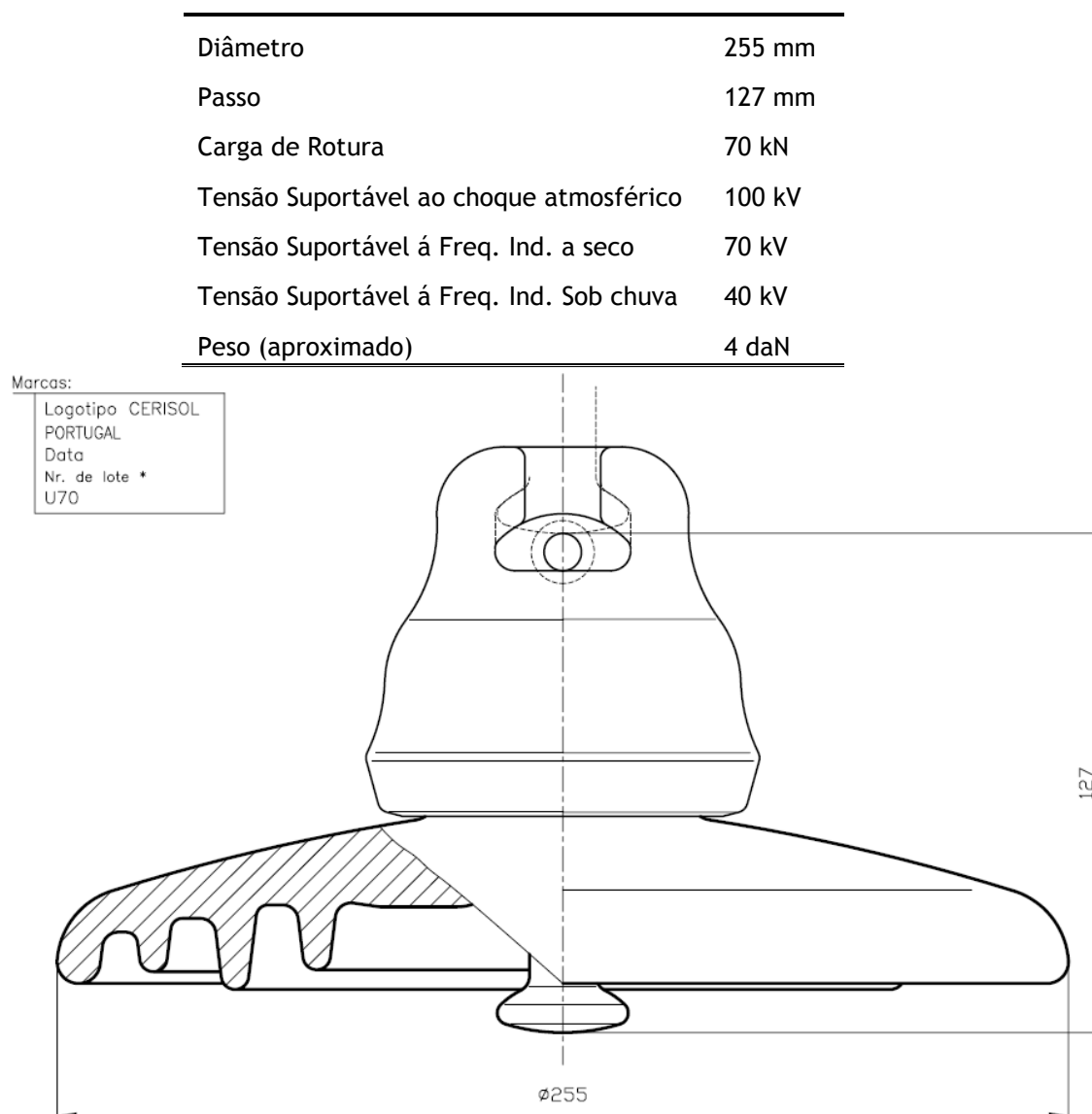


Figura 4-3 - Isolador Adotado [24].

## 4.5 - Impactos Técnicos e Económicos: Caso de estudo e Análise Crítica dos Resultados

O caso de estudo é composto por um cantão, composto por vãos de comprimentos diferentes e que se encontra em alinhamento. Numa primeira fase será analisada a viabilidade do projeto no que toca ao movimento da cadeia de isoladores que se encontra em suspensão. Em seguida, um dos apoios de amarração vai ser deslocado no terreno, e o objetivo é analisar se todos os pressupostos de segurança da cadeia em suspensão continuam a ser respeitados.

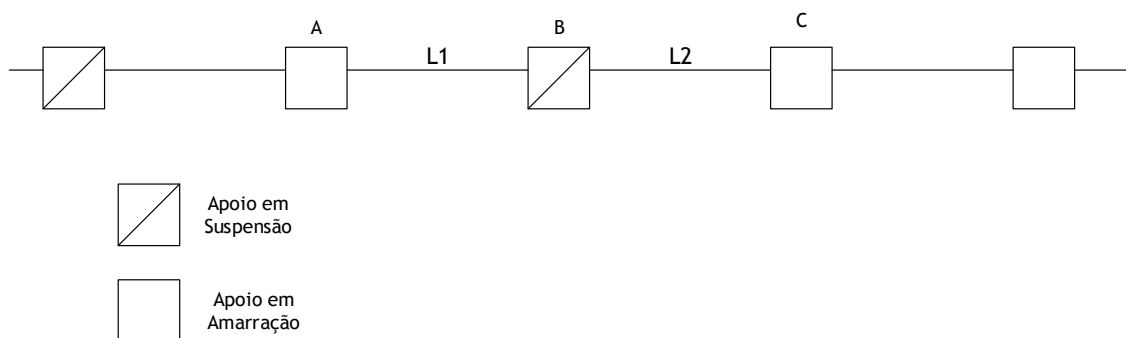


Figura 4-4 - Caso de estudo - Situação de alinhamento - Fase 1

Utilizando o cabo mencionado na seção 4.3, e sendo os comprimentos de L1 e L2, 500 metros e 525 metros respetivamente, vai ser analisado em seguida o movimento da cadeia de isoladores, na situação de alinhamento. O desvio transversal é calculado com base no fluxograma da Figura 3-4. Sendo assim o primeiro passo é o cálculo das forças do vento para o estado Primavera e Verão através da equação (eq. 2.7)

$$F_{v1} = 0.6 \times 1 \times 36 \times 19.2 \times 10^{-3} = 0.507 \text{ daN/m}^2$$

$$F_{v2} = 0.6 \times 1 \times 90/2 \times 19.2 \times 10^{-3} = 0.633 \text{ daN/m}^2$$

Para obter o desvio máximo, irá ser utilizado o caso mais desfavorável, ou seja, o estado Primavera:

$$F_{v_{cond}} = \left( F_{v2} \times \frac{L1 + L2}{2} \right) = 324.49 \text{ daN}$$

$$F_{v_{isol}} = 0.6 \times 1 \times \frac{90}{2} \times 19.2 \times 10^{-3} \approx 16 \text{ daN}$$

Posto isto, considerando a cadeia de isoladores composta por 4 isoladores, o que resulta num peso combinado de aproximadamente 12 daN (ignorando peso dos acessórios), o peso dos condutores dado por:

$$P_c = \omega \times \frac{L1 + L2}{2} = 624.7375 \text{ daN}$$

O descolamento angular da cadeia de isoladores é dado pela equação (eq. 3.8):

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{F_{v_{cond}} + \frac{F_{v_{isol}}}{2}}{P_c + \frac{P_{isol}}{2}} \right) [^\circ]$$

$$\theta = 27.80^\circ$$

$$\Delta x = L_{iso} \times \sin \theta = 1.2 \times \sin 27.80 = 0.56 \text{ m}$$

Para o cálculo e análise do desvio longitudinal da cadeia de isoladores (CI), é necessário recorrer ao mecanismo de cálculo presente no fluxograma da Figura 3-5. O primeiro passo é então calcular as forças do vento para cada estado atmosférico pela equação (eq. 2.7).

$$F_v = q_h \times G_q \times G_x \times C_x \times A$$

$$F_{v1} = 0.6 \times 1 \times 36 \times 19.2 \times 10^{-3} = 0.507 \text{ daN/m}^2$$

$$F_{v2} = 0.6 \times 1 \times 90 \times 19.2 \times 10^{-3} = 1.266 \text{ daN/m}^2$$

Em seguida, fazendo uso da equação (eq. 2.13), é necessário determinar os coeficientes de sobrecarga:

$$m = \frac{\sqrt{(\omega_v \times \sigma + \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2])^2 + F_v^2}}{\omega_v \times \sigma}$$

$$m_1 = \frac{\sqrt{(0.722)^2 + 0.415^2}}{0.722} = 1.083$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(0.722)^2 + 1.037^2}}{0.722} = 1.442$$

Com os coeficientes de sobrecarga determinados, já é possível, através das equações (eq. 2.15) e (eq. 2.16), calcular o  $L_{cr}$  e  $L_{eq}$  Respetivamente.

$$L_{cr} = \frac{\sigma \times t}{\omega} \times \sqrt{\frac{(\theta_k - \theta_j) \times 24 \times \alpha}{(m_k^2 - m_j^2)}} [m]$$

$$L_{cr} = \frac{215.5 \times 11.99}{0.722} \times \sqrt{\frac{(15 - (-5)) \times 24 \times 1.7 \times 10^{-3}}{(1.750^2 - 1.153^2)}} = 361.362 \text{ m}$$

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{300^3 + 400^3}{650}} = 512.957 \text{ m}$$

Analisando a árvore de decisão da Figura 2-2, o estado mais desfavorável é a primavera, logo vai ser calculada a tração de montagem para uma temperatura de 20° com coeficiente de sobrecarga unitário através da equação dos estados (eq. 2.14) .

$$\theta_k + \frac{t_k}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} = \theta_j + \frac{t_j}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2}$$

$$20 + \frac{t_m}{7850 \times 1.77 \times 10^{-5}} - \frac{1.219^2 \times 1 \times 512.957^2}{24 \times 1.77 \times 10^{-3} \times 325^2 \times t_m^2}$$

$$= 15 + \frac{14}{7850 \times 1.7 \times 10^{-3}} - \frac{1.219^2 \times 1.442^2 \times 512.957^2}{24 \times 1.77 \times 10^{-5} \times 325^2 \times 14^2}$$

$$t_m = 10.814 \text{ daN/mm}^2$$

O próximo passo é verificar qual o efeito da variação da temperatura. Para tal é necessário analisar os vãos L1 e L2 separadamente. Os resultados obtidos seguindo a mesma metodologia foram os seguintes:

Tabela 4-4 - Resultados para a tração mecânica nos dois vãos, para as diferentes temperaturas.

Temperatura [°C]	Vão AB $t_{mAB}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	Vão BC $t_{mBC}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	12.192	12.103
0	11.892	11.823
10	11.33	11.297
20	10.814	10.814
30	10.343	10.371
40	9.911	9.964
50	9.515	9.591
60	9.153	9.246
70	8.82	8.929
80	8.513	8.637

Considerando como positiva a direção da tração do vão BC, a tração resultante é dada por:

$$t_{res} = t_{mL2} - t_{mL1} \quad [daN/mm^2]$$

Tabela 4-5 - Tração resultante para as diversas temperaturas.

Temperatura [°C]	$t_{res}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	-0.089
0	-0.069
10	-0.033
20	0.000
30	0.029
40	0.054
50	0.075
60	0.094
70	0.110
80	0.123

Como o peso, tanto dos isoladores como dos condutores, é o mesmo que foi calculado para o desvio transversal, e não varia com a temperatura visto o cantão se encontrar em patamar, o descolamento angular da cadeia de isoladores é dado pela equação (eq. 3.8):

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{t_{res}}{P_c + \frac{P_{isol}}{2}} \right) [^\circ]$$

Tabela 4-6 - Deslocamento angular da cadeia de isoladores, nas diversas temperaturas.

Temperatura [°C]	$\theta$ [°]
-5	-2.625
0	-2.041
10	-0.961
20	0.000
30	0.846
40	1.583
50	2.220
60	2.767
70	3.234
80	3.631

Através da equação (eq. 3.9) é possível calcular o deslocamento  $\Delta x$  da cadeia de isoladores:

$$\Delta x = Liso \times \sin \theta$$

Tabela 4-7 - Deslocamento da cadeia de isoladores para as diferentes temperaturas.

Temperatura [°C]	$\Delta x$ [m]
-5	-0.055
0	-0.043
10	-0.020
20	0.000
30	0.018
40	0.033
50	0.046
60	0.058
70	0.068
80	0.076

Para o dimensionamento do apoio, de forma a analisar os impactos económicos, é necessário calcular a força do vento sobre o cabo de guarda, bem como o peso deste [6]. Na análise do cabo de guarda vão ser adotados os mesmos pressupostos que foram utilizados no cálculo do movimento dos apoios, ou seja a força do vento é calculada nas condições de vento

máximo e a tração de montagem é calculada para o estado atmosférico mais desfavorável, admitindo que o cabo de guarda é tem o mesmo comprimento nos dois vãos. Os resultados obtidos para o cabo de guarda foram então:

Tabela 4-8 - Solicitações no cabo de guarda.

Cabo de guarda	
Esforços	daN
Força Vento	221.4
Tração condutores	504.014
Peso	279.825

Considerando que a cadeia de isoladores tem 1.20 metros, e admitindo uma tolerância de movimento de 10% do seu comprimento, as condições de segurança necessárias à aplicação de cadeia de isoladores em suspensão são verificadas. Com isto, é só necessário escolher um apoio que suporte os principais esforços calculados anteriormente. Como tal, e de forma a simular a situação mais desfavorável, vai ser considerando que a solicitação principal (horizontal) do apoio é dada pelo somatório das forças do vento com a tração dos cabos. Já a solicitação secundária (vertical) corresponde ao somatório do peso dos apoios, dos isoladores e do cabo de guarda [25]. Visto o armação GAL ser composta por três cadeias de isoladores, e admitindo que todas estão sujeitas às mesmas solicitações, ou seja o caso mais desfavorável, os resultados obtidos:

Tabela 4-9 - Esforços sobre o apoio B.

FASE 1	
Esforços	daN
Força Vento	552.8894
Tração condutores	0
Peso dos condutores, isoladores e cabo de guarda	910.5625
Número de cadeias	3
Solicitação Principal	1658.668
Solicitação Secundária	2731.688

Para escolher o apoio é ainda necessário calcular a flecha máxima no mesmo. Visto os vãos estarem montados com a mesma tração a 20°, a flecha máxima será no vão de maior comprimento. Como se encontram em patamar, a flecha será máxima a meio do vão. Visto que com o aumento de temperatura, os cabos “relaxam”, a tração a utilizar será a calculada na Tabela 4-4, para a temperatura de 80°. Fazendo uso então das equações (eq. 2.20) e (eq. 2.24):

$$P = \frac{H}{\omega} = \frac{8.64 \times 325}{1.219} = 2303.53 \text{ m}$$

$$y = P \times \left( \cosh\left(\frac{L}{2P}\right) - 1 \right) = 2303.53 \times \left( \cosh\left(\frac{525}{2 \times 2303.53}\right) - 1 \right) = 14.97 \text{ m}$$

Tendo em conta as distâncias de segurança definidas na seção 3.2 e que são necessárias cumprir, o apoio selecionado terá uma altura de 24 metros pois a distância máxima que é necessário assegurar será de aproximadamente 8 metros, relacionada com a distância a estradas. Este terá de ser capaz de suportar uma solicitação principal de 1659daN e uma solicitação secundária de 2732 daN.

Agora, é necessário analisar a situação em que o apoio C é deslocado no espaço, formando um ângulo B com o apoio B tal como se observa na Figura 4-5. O objetivo é determinar qual o ângulo máximo aplicável entre as linhas, para que não seja necessário a substituição da armação do apoio e qual o valor limite do ângulo que provoca a permutação do poste. A metodologia de cálculo seguida vai ser o descrito na seção 3.6 do presente trabalho.

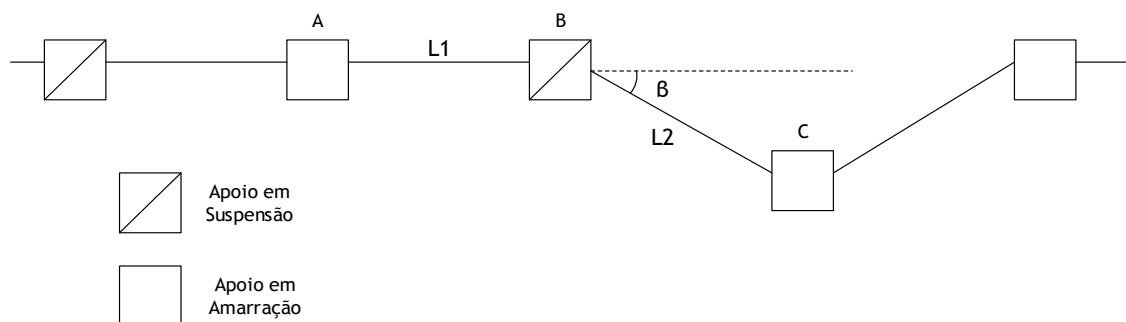


Figura 4-5 - Situação de ângulo, Fase 2

Admitindo um valor de  $\beta$  de  $5.730^\circ$  (0.1 rad), o primeiro passo é calcular a força vento para o estado de Primavera, bem como o coeficiente de sobrecarga e o vão equivalente através das equações (eq. 2.7), (eq. 2.13) e (eq. 2.16):

$$F_{v2} = 0.6 * 1 * 36/2 * 23.5 * 10^{-3} = 0.633 \text{ daN/m}^2$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{(1.219)^2 + 0.633^2}}{1.219} = 1.127$$

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{500^3 + 525^3}{650}} = 512.957 \text{ m}$$

Adotando a mesma temperatura de montagem, ou seja  $20^\circ\text{C}$ , e através da equação dos estados definidos na seção 2.5:

$$20 + \frac{t_m}{7850 \times 1.77 \times 10^{-3}} - \frac{1.219^2 \times 1 \times 512.957^2}{24 \times 1.77 \times 10^{-3} \times 325^2 \times t_m^2}$$

$$= 15 + \frac{14}{7850 \times 1.77 \times 10^{-3}} - \frac{1.219^2 \times 1.127^2 \times 512.957^2}{24 \times 1.77 \times 10^{-3} \times 325^2 \times 14^2}$$

$$t_m = 12.824 \text{ daN/mm}^2$$

De seguida analisar-se-á o que acontece, em cada vão, quando a temperatura varia. Para o vão AB resulta que:



Tabela 4-10 - Variação da tração com a temperatura, no vão AB.

Temperatura	TAB	$F_{x_{AB}}$	$F_{y_{AB}}$
[°C]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	14.657	14.657	0
20	12.824	12.824	0
80	9.705	9.705	0

E para o vão BC:

Tabela 4-11 - Variação da tração com a temperatura, no vão BC.

Temperatura	TBC	$F_{x_{BC}}$	$F_{y_{BC}}$
[°C]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[daN/mm <sup>2</sup> ]
-5	14.564	14.492	1.454
0	12.824	12.760	1.280
80	9.849	9.800	0.983

Considerando a tração TBC como sendo positiva segundo o eixo das abcissas e das ordenadas:

Tabela 4-12 - Tração resultante para as diferentes temperaturas.

Temperatura	$F_{R_T}$	$F_{R_x}$	$F_{R_y}$	$\phi$
[°C]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[°]
-5	1.463	-0.165	1.454	-96.493
20	1.282	-0.064	1.280	-92.864
80	0.988	0.095	0.983	-84.493

Considerando como sendo máxima a força de vento que atua sobre os condutores e isoladores:

$$F_v = \left( F_{v2} \times \frac{L1 + L2}{2} \right) + \frac{F_{v_{isol}}}{2} = \left( 0.518 \times \frac{500 + 550}{2} \right) + 8 = 332.489 \text{ daN}$$

Como em análise está o apoio exterior, é necessário calcular o ângulo da força do vento através da equação (eq. 3.18):

$$\alpha_{ext} = -\frac{180 - \beta}{2} = -92.865^\circ$$

Visto a força do vento não variar com a temperatura, o cálculo das suas componentes x e y só é necessário ser realizado uma vez, através das equações (eq. 3.20) e (eq 3.21) respetivamente. A direção do vento é a mesma da força resultante quando não há variação de temperatura.

$$F_{x_{vento}} = F_v \times \cos \alpha = 16.618 \text{ daN}$$

$$F_{y_{vento}} = F_v \times \sin \alpha = 332.074 \text{ daN}$$

A direção do vento é a mesma da força resultante quando não há variação de temperatura. Tendo em conta a equação (eq. 3.26), é possível calcular o deslocamento.

Tabela 4-13 - Deslocamento da cadeia de isoladores.

Temperatura [°C]	$F_R$ [daN]	$F_x$ [daN]	$F_y$ [daN]	$\lambda$ [°]	Pc+Piso [daN]	$\theta$ [°]	$\Delta x$ [m]
-5	807.700	70.401	804.626	-95.000	246.7	-52.014	0.946
20	749.091	37.439	748.155	-92.865	246.7	-49.902	0.918
80	651.793	-14.190	651.639	-88.753	246.7	-45.941	0.862

Como é possível verificar na Tabela 4-13, visto a armação ter um braço com o comprimento de 2.25 metros, o deslocamento da cadeia de isoladores não é crítico para um ângulo  $\beta$  de 5.7 graus. Variando os valores do ângulo é possível verificar qual é a situação limite.

Tabela 4-14 - Deslocamento da cadeia de isoladores, para diversos valores de ângulo.

Ângulo	FR			$\lambda$			$\Delta x$		
	-5°	20°	80°	-5°	20°	80°	-5°	20°	80°
5.73	807.7	749.091	651.793	95.000	92.865	651.793	0.946	0.918	0.862
6.875	902.466	832.319	715.098	95.348	93.438	715.098	0.984	0.956	0.900
8.594	1044.526	957.066	810.026	95.946	94.297	810.026	1.027	1.002	0.947
10.027	1162.8	1060.915	889.08	96.493	95.013	889.08	1.055	1.031	0.979

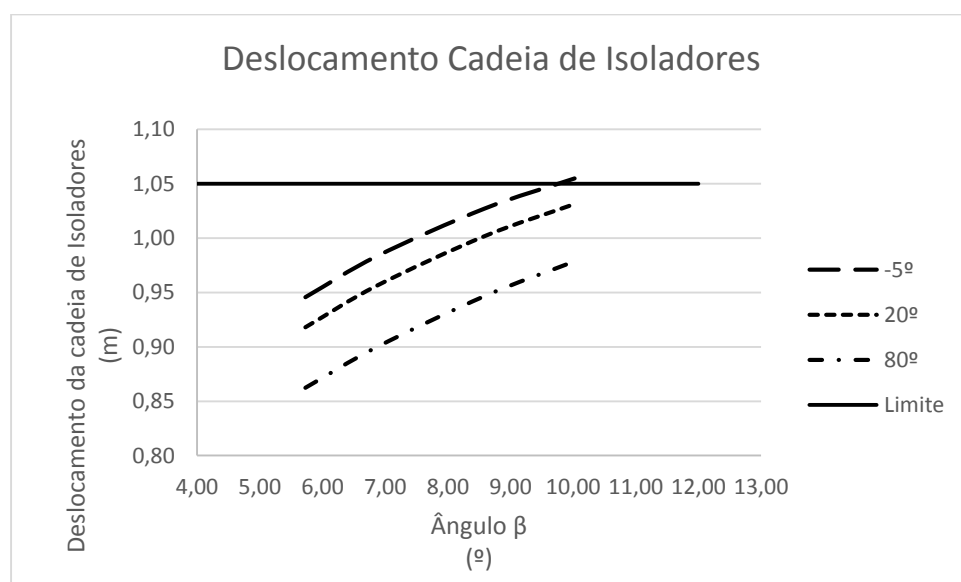


Figura 4-6 - Deslocamento da cadeia de isoladores para diferentes temperaturas, em função do ângulo.

Pela análise, tanto da Figura 4-6, como da Tabela 4-14 é possível concluir que o ângulo máximo é cerca de 10 graus. Para valores superiores, é necessário proceder-se à substituição

da armação do poste, seja aumentando o comprimento do braço ou adotando antes cadeias de isoladores de amarração, passando a utilizar uma armação tipo GAN. As consequências desta alteração a nível económico serão abordadas mais à frente.

É necessário averiguar se existe a necessidade de proceder a mudança do poste. Para tal, é preciso calcular as solicitações a que o poste vai estar submetido devido à nova disposição dos apoios. Tendo em conta os resultados da Tabela 4-13, e como o apoio é dimensionado para uma temperatura de 20°, é necessário adicionar a estes os esforços provocado pelo cabo de guarda. O cálculo destes é idêntico ao efetuado para o cabo condutor e os resultados são:

Tabela 4-15 - Resultados para o cabo de guarda, na situação de ângulo.

Temperatura	$t_{mCG}$	$F_{RTCG}$	$F_{R_{xCG}}$	$F_{R_{yCG}}$	$F_{vCG}$	$F_{vCG_x}$	$F_{vCG_y}$	$P_{CG}$
[°]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	[daN]	[daN]	[daN]	[daN]	[daN]	[daN]	[daN]
20	3.645	207.79	18.458	207	221.4	19.348	20.553	279.825

Onde:

- $F_{RTCG}$  é a força resultante das trações nos dois vãos, referente ao cabo de guarda em daN.
- $F_{R_{xCG}}$  é a componente segundo x de  $F_{RTCG}$  em daN.
- $F_{R_{yCG}}$  é a componente segundo y de  $F_{RTCG}$  em daN.
- $F_{vCG}$  é a força do vento nos cabos de guarda em daN.
- $F_{vCG_x}$  é a componente segundo x de  $F_{vCG}$  em daN.
- $F_{vCG_y}$  é a componente segundo y de  $F_{vCG}$  em daN.
- $P_{CG}$  é o peso do cabo de guarda em daN.

Para ser possível verificar se o poste dimensionado na situação de alinhamento suporta os esforços provocados pela alteração da disposição do apoio C, é necessário adicionar o resultado da Tabela 4-15 aos da Tabela 4-13, o que resulta, para um  $\theta$  igual a 5.730 graus e considerando a armação composta por três cadeias, em:

Tabela 4-16 - Esforços que o apoio tem de suportar na situação de alinhamento

FASE 2	
Esforços	daN
$F_X$	54.44381
$F_Y$	1087.969
$F_Z$	910.5625
Solicitação Principal	3427.238
Solicitação Secundária	2731.688

O apoio escolhido para a situação de alinhamento não é capaz de suportar esta nova disposição dos apoios, ou seja, é necessária a sua substituição. A troca de apoio, como será analisado a seguir, tem diversas consequências, tanto a nível financeiro como a nível de da qualidade de serviço. Por fim, na figura seguinte é possível observar a variação da solicitação principal a que o apoio está sujeito, em função do ângulo entre as linhas

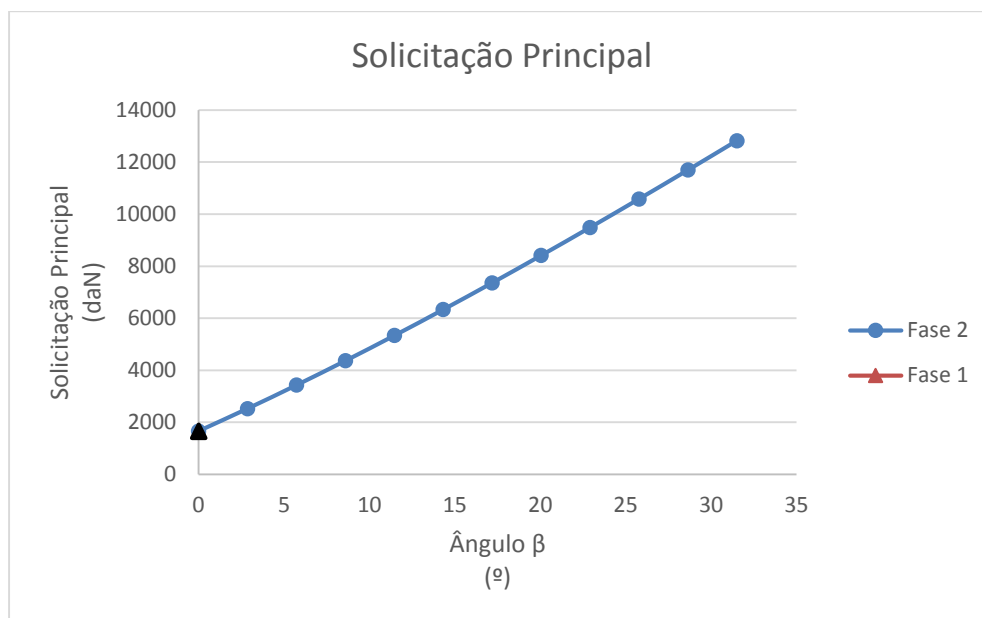


Figura 4-7 - Evolução da intensidade da solicitação principal conforme o ângulo entre as linhas.

Agora é necessário analisar as consequências a nível económico que, o deslocamento do apoio C provoca. Como foi analisado anteriormente, existem dois fatores que podem levar a que seja necessário a substituição da armação ou do apoio, são eles a distancia de segurança entre o apoio e a cadeia de isoladores que é necessário garantir quando ocorre o deslocamento desta e assegurar que o apoio está corretamente dimensionado tendo em conta as solicitações a que vai estar sujeito. Considerando agora os materiais adotados é possível realizar uma estimativa dos preços para estes na situação de alinhamento (Fase 1):

Tabela 4-17 - Preço e quantidade para a situação de alinhamento

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b> (unid)	<b>Preço unitário</b> (€/unid)	<b>Preço Total</b> (€)
Armação GAL	1	250	250
Cabo Al/Aço 325	1030 <sup>2</sup>	2,83	2914,9
Isolador	4	11	44
Apoio Betão	1	1700	1700

Como se pode observar na Tabela 4-17, o preço final é de cerca de 4908 €, tendo em conta apenas os elementos em questão. Não foram incluídos na análise elementos como pinças, parafusos entre outros. Em seguida vai ser calculado o impacto económico da deslocação do apoio C. Visto que o preço dos isoladores é pouco importante no preço final, este será considerado constante. Para a situação de ângulo conclui-se que não é necessária a alteração da armação, visto o deslocamento da cadeia de isoladores nunca atingir valores críticos. Apesar disso a solicitação principal do poste aumentou para um valor de 3427 daN, o que implica a substituição deste.

Tabela 4-18 - Preço e quantidade para a situação de ângulo.

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b> (unid)	<b>Preço unitário</b> (€/unid)	<b>Preço Total</b> (€)
Armação GAL	1	250	250
Cabo Al/Aço 325	1030	2,83	2914,9
Isolador	4	11	44
Apoio Betão	1	2300	2300

Esta nova disposição dos apoios leva a um aumento do preço do projeto em cerca de 500 euros, passando a estar orçamentado em cerca de 5508 euros. Apesar deste aumento, é de realçar o fato de se continuar a aplicar cadeias de isoladores em suspensão na armação do tipo GAL. Porém, à medida que se aumenta o ângulo  $\beta$ , vai ser necessário a substituição da armação, tal como é possível verificar na Figura 4-6. No gráfico seguinte está representada uma

---

<sup>2</sup> O comprimento de cabo considerado é ligeiramente superior ao resultante da soma dos dois vãos. Isto acontece por razões de segurança devido ao corte que é necessário efetuar nos apoios em amarração.

estimativa da evolução do preço final do projeto, tendo em conta a variação do ângulo  $\beta$  entre os vãos.

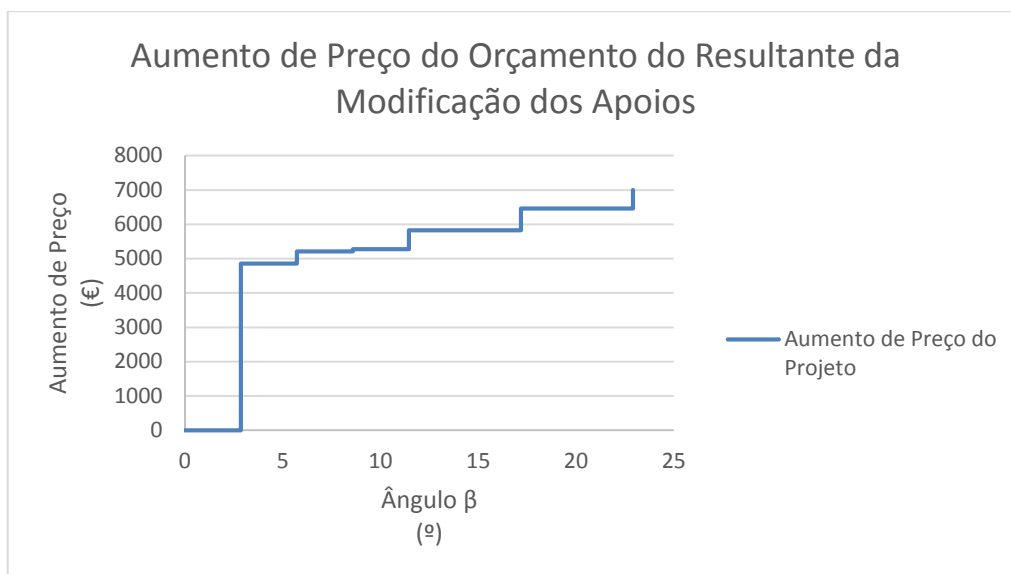


Figura 4-8 - Aumento do preço do projeto em função de  $\beta$ .

Através do caso de estudo é possível perceber que a modificação de um apoio do cantão pode ser realizada sem que seja necessária a alteração da estrutura do apoio central, contudo, a modificação não poderá ser muito significativa. Na Figura 4-8, verifica-se que é necessário proceder em primeiro lugar à substituição do apoio do que da armação. Isto é explicado, pelo crescimento elevado das solicitações a que o apoio estará sujeito à medida que o ângulo  $\beta$  aumenta, como se pode observar na Figura 4-7. Ao contrário da substituição do apoio, que tem um custo elevado para o projeto, a modificação da armação é bastante mais económica e nem sempre é necessária. No caso de estudo, a substituição da armação só é necessária para um ângulo  $\beta$  de cerca de  $10^\circ$ , que provoca um pequeno aumento do preço na Figura 4-8. Logo, no caso de o apoio ser sobredimensionado na altura do projeto inicial, a modificação dos apoios poderia, para situações de ângulo inferior a  $10^\circ$ , sair a um custo reduzido, visto não ser necessário substituir nem o apoio nem a armação.

## Capítulo 5

# Principais Conclusões e Possíveis Trabalhos Futuros

O Capítulo 5 encerra a dissertação e apresenta as conclusões retiradas do trabalho desenvolvido ao longo da dissertação, bem como apresenta as limitações da metodologia de cálculo utilizada e dos ficheiros de MatLab e Excel desenvolvidos. Sugere também ainda possíveis progressos para a metodologia e método de cálculo utilizado.

### 5.1 - Conclusões

O trabalho consistiu numa primeira fase na dedução matemática das equações aplicadas no cálculo mecânico de linhas aéreas. Foi simulada com a máxima precisão o comportamento dos condutores através da curva catenária. O critério de evitar aproximações estendeu-se também ao cálculo do vão equivalente, onde foi adotado um método de cálculo que tem em conta os declives existentes entre os vãos. Por fim, a análise das forças existentes em vãos contínuos permitiu uma melhor compreensão das solicitações a que cada apoio está sujeito. Verificou-se que este cálculo nem sempre é imediato pois, o peso dos condutores sobre um apoio é bastante variável com declive dos apoios.

No que toca ao desvio transversal, para situações em patamar, o seu movimento raramente é crítico, visto que o peso que estes provocam sobre a cadeia, é suficiente para limitar o movimento provocado pela força do vento. Quando se está na presença de situações de declive, o movimento da cadeia varia conforme o tipo de situação em questão, sendo que algumas disposições são até benéficas. O desvio longitudinal é de maior complexidade de análise quando comparado com o anterior. Nas disposições em patamar, a diferença máxima de comprimento entre vãos, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 3-6 e 3-7, varia conforme o comprimento dos vãos, e a tolerância de movimento para a cadeia de isoladores que o

projetista deseje definir. Nas situações de declive, é necessário ter em conta no cálculo do peso dos condutores sobre o apoio que o peso vai variar com a tração dos cabos, que por sua vez variam com a temperatura. À semelhança do que acontece para o desvio transversal em situações de declive, existem situações em que o desvio longitudinal é maior quando comparado com a mesma situação em patamar, e outras em que este é menor, ou seja tudo depende da disposição dos apoios. Nas situações de ângulo foi possível concluir que, o fato do cantão ter uma disposição em ângulo, aumenta de forma significativa as forças atuantes sobre a cadeia de isoladores, tal como se observa na Figura 4-7, o que leva a movimentos de magnitude superior, quando comparado com as situações em alinhamento. A variação da temperatura nestes casos leva a que a força resultante varie na sua intensidade e direção quando os vãos não possuem o mesmo comprimento. A aplicação de cadeias em suspensão não se revelou viável, tendo em conta o comprimento de braço definido. Uma das soluções passaria por aumentar o comprimento deste nas situações de ângulo, permitindo assim uma maior amplitude de movimento da cadeia de isoladores. Para o estudo efetuado foram desenvolvidos dois ficheiros informáticos, um sobre a forma de um script de MatLab e outro num ficheiro Excel, sendo que ambos utilizam o mesmo método de cálculo.

Com a realização do caso de estudo analisado concluiu-se que o deslocamento de um apoio do cantão pode ser realizado sem que seja necessária a alteração da estrutura do apoio em suspensão, ou ate da armação contudo, esta modificação não poderá ser significativa. Tendo em conta os dados do caso de estudo, concluiu-se que até um ângulo entre linhas de cerca de  $10^\circ$  é possível continuar a utilizar a cadeia de isoladores em suspensão sem violar a distância de segurança entre o apoio e os condutores. Porém, tendo em conta que o dimensionamento efetuado para o apoio, verificou-se que este não suportaria as forças resultantes da nova disposição dos apoios. Apenas seria possível manter o apoio para um ângulo entre vãos inferior a  $2^\circ$ . Visto a substituição de um apoio ter um custo elevado, uma das soluções passaria pela, que no momento em que linha seja projetada, os apoios que vão ser constituídos por cadeias de isoladores de suspensão, sejam sobredimensionados, para que em situações futuras seja possível proceder a alterações na disposição dos apoios adjacentes, sem ser necessário colocar um apoio novo.

A operadora da rede de distribuição e responsável pelo projeto e construção de linhas elétricas ( EDP Distribuição, SA), nos seus projetos tem por norma utilizar uma regra empírica em que só são utilizadas situações de apoio em suspensão, quando o comprimento dos vãos não ultrapassa 25% do vão equivalente. Neste estudo a metodologia adotada é diferente, procurou-se estabelecer um limite técnico para a aplicação de cadeia de isoladores com base no comprimento do vão mais pequeno do cantão. Comparando as metodologias, verifica-se que os resultados obtidos ao longo da dissertação são mais pessimistas, ou seja, a diferença de comprimento entre os vãos não pode ser tão elevada como a regra da EDP sugere, principalmente para vãos de pequeno comprimento e caso a tolerância de movimento da cadeia



de isoladores seja de 5%. Caso a tolerância seja de 10%, para vãos de comprimento elevado, o limite é superior ao sugerido pela EDP. A EDP admite que, nos projetos de redes elétricas aéreas, os apoios vão estar sujeitos a forças superiores em cerca de 5% a 10% sobre a qual foram dimensionados. Tendo em conta, que a modificação do apoio em ângulo provocou um aumento das solicitações elevado sobre o apoio em suspensão, esta regra não se revelou suficiente para evitar a substituição do apoio. Uma solução passaria pela que, no momento do projeto inicial, o apoio em suspensão seja sobredimensionado.

De forma sumária, deste trabalho resultou que a aplicação de cadeia de isoladores em suspensão num cantão constituído apenas por um apoio em suspensão, é viável, sendo que o limite para a diferença de comprimento entre vãos contínuos, varia com o tamanho do vão mais pequeno, e que para vãos pequenos o limite é bastante pequeno e para vãos de tamanho superior o seu limite já é significativo. Em situações de declive, a sua aplicabilidade está condicionada à disposição dos apoios, que vai ter influência no peso sobre a cadeia, existindo situações mais favoráveis quando comparando com as situações de patamar. A modificação dos apoios resulta na variação das solicitações sobre os apoios e seus constituintes, mas tal não implica a necessidade absoluta de se efetuar a troca de equipamentos.

## 5.2 - Limitações da Metodologia de Cálculo Adotada

O método de cálculo utilizado permite o estudo de qualquer situação, mas o estudo efetuado reservou-se a um cantão composto por 3 apoios, dois apoios em amarração e um apoio em suspensão.

Nas redes elétricas aéreas muitas vezes é necessário colocar um cantão em declive e simultaneamente em situação de ângulo. No entanto esta possibilidade não foi admitida, consistindo assim numa limitação da metodologia uma vez que impede que muitas situações reais sejam analisadas.

Para o estudo do comportamento da rede elétrica foi utilizado um cabo considerado recorrente em redes de transporte e distribuição de energia aéreas, bem como foram admitidos valores para o peso da cadeia de isoladores e para o comprimento desta que se admitiu como sendo aplicáveis. Apesar de estes poderem ser alterados, quer no Excel quer no MatLab, os resultados do estudo, ou seja os limites alcançados, apenas são relativos a este cabo e para esta cadeia. Contudo, as conclusões retiradas relativamente ao movimento mantém-se. Relativamente às distâncias de segurança entre os apoios e os condutores para o desvio transversal, estas foram definidas admitindo uma tensão nominal de 30 kV. Para tornar a aplicação possível a diversos níveis de tensão seria necessário o cálculo da distância que é necessário assegurar para estes.

No caso de estudo foi apenas considerado para efeitos de cálculo do orçamento do projeto, os principais componentes de um apoio. Visto não terem sido tidos em conta aspetos como fundações, transporte, montagem, peças de tamanho reduzido (ex: parafusos),

constituintes das armações (ex: pinças), entre outras, o preço obtido não foi exato. Para além disto, o caso de estudo apenas tendo em conta a modificação de um apoio, não tendo em conta que pode ser necessário a alteração de dois apoios.

### **5.3 - Possíveis Progressos e Trabalhos Futuros**

Os progressos ao trabalho realizado poderiam passar pela resolução das limitações apontadas na seção 5.2 ao método de cálculo utilizado. Assim, ultrapassadas estas limitações, a metodologia passaria a ter uma maior gama de aplicação e poderia ser aplicada a redes elétricas aéreas, nacionais e internacionais.

## Referências

- [1] EN 50341-1 *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV Part 1: General requirements - Common specifications*, 2001.
- [2] N. Sequeira, "Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a norma EN50341-1," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [3] *Aspetos Normativos Nacionais para Portugal referentes a EN50341-3-17*, 2001.
- [4] H. Pohlmann and R. Thomas, "Sag increases resulting from conductor creep on medium-voltage transmission lines, and the problem of measuring sag on live overhead lines," in *Electricity Distribution*, 1993. CIREN. 12th International Conference on, 1993, pp. 3.20/1-3.20/5 vol.3.
- [5] DSEE, *Edição DGE do Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão*. Lisboa, 1993.
- [6] M. Figueiredo, "Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão com Estudo do Comportamento Longitudinal das Cadeias de Isoladores," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [7] C. S. Galvão, "Redes eléctricas de média e baixa tensão, Aspectos de projecto, licenciamento e exploração em contexto operacional," Master, Engineer, FEUP, 2010.
- [8] L. M. Keselman and Y. Motlis, "Application of the ruling span concept for overhead lines in mountainous terrain," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 1385-1390, 1998.
- [9] J. Lummis and H. D. Fischer, "Practical Application of Sag and Tension Calculations to Transmission-Line Design [includes discussion]," *Power apparatus and systems, part iii. transactions of the american institute of electrical engineers*, vol. 74, 1955.
- [10] L. M. Checa, *Linhas de Transporte de Energia*: Edições CETOP, 1986.
- [11] M. T. De Almeida, R. D. Fuchs, P. R. Labegalini, and J. A. Labegalini, *Projetos Mecanicos das Linhas Aereas de Transmissão*: EDGARD BLUCHER.
- [12] P. Ramachandran and V. Vittal, "On-Line Monitoring of Sag in Overhead Transmission Lines with Leveled Spans," in *Power Symposium, 2006. NAPS 2006. 38th North American*, 2006, pp. 405-409.
- [13] M. Keshavarzian and C. H. Priebe, "Sag and tension calculations for overhead transmission lines at high temperatures-modified ruling span method," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 2000, p. 2527 vol. 4.
- [14] P. Ramachandran, V. Vittal, and G. T. Heydt, "Mechanical State Estimation for Overhead Transmission Lines With Level Spans," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 908-915, 2008.
- [15] J. F. Nash and J. F. Nash, "Sag and Tension Calculations for Cable and Wire Spans Using Catenary Formulas," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 64, pp. 685-692, 1945.
- [16] P. Tucoulat, *Construction des lignes aériennes*, 6 ed. Paris: Éditions Eyrolles, 1963.
- [17] G. Zoppetti, *Redes Eléctricas de Alta Y Baja Tensión*, Quinta Edición ed. Barcelona, 1972.

- [18] J. Bradbury, G. F. Kuska, and D. J. Tarr, "Sag and tension calculations for mountainous terrain," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 129, pp. 213-220, 1982.
- [19] P. N. F. Kiessling, J.F.Nolasco e U.Kaintzyk, *Overhead power lines planning, design, construction*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2003.
- [20] J. Ramires, "Projecto de linha de alta tensão - Estudo do comportamento eléctrico," Master, FEUP, 2008.
- [21] Y. Motlis, J. S. Barrett, G. A. Davidson, D. A. Douglass, P. A. Hall, J. L. Reding, *et al.*, "Limitations of the ruling span method for overhead line conductors at high operating temperatures," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 549-560, 1999.
- [22] EDP. (2005). *Material para linhas aéreas- Armações de aço para postes de betão de MT- Características e ensaios*. Available: [www.edpdistribuicao.pt](http://www.edpdistribuicao.pt) -> profissional -> Documentos Normativos -> Pesquisar por Código -> DMA-c67-620/N, Acedido em 18 de Junho de 2013
- [23] Cabelte, "Cabo OPGW AS/AA 32/113 ST 1x24 F," Cabelte, Ed., ed.
- [24] Cerisol. Available: [www.cerisol.com](http://www.cerisol.com) -> Products -> by application -> Transmission and Distribution -> Distribution -> P2-501E.pdf, Acedido em 16 de Junho de 2013
- [25] Sirolis. (2013). *Postes para a Rede Elétrica de Média Tensão*. Available: <http://www.sirolis.pt> -> Produtos -> Postes Para a Rede Elétrica -> Postes de Média Tensão, Acedido em 16 de Junho de 2013

## Anexo A

# Dedução das Equações Relativas ao Cálculo Mecânico

### Vão em Patamar

A figura seguinte representa um vão, onde os seus apoios encontram-se no mesmo patamar:

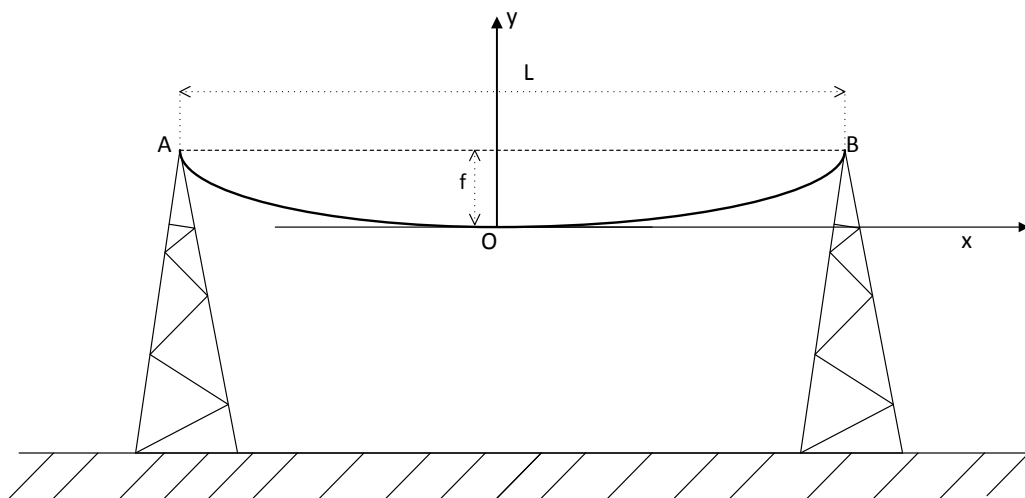


Figura A-1 - Vão em Patamar

Analisando agora apenas um segmento do cabo:

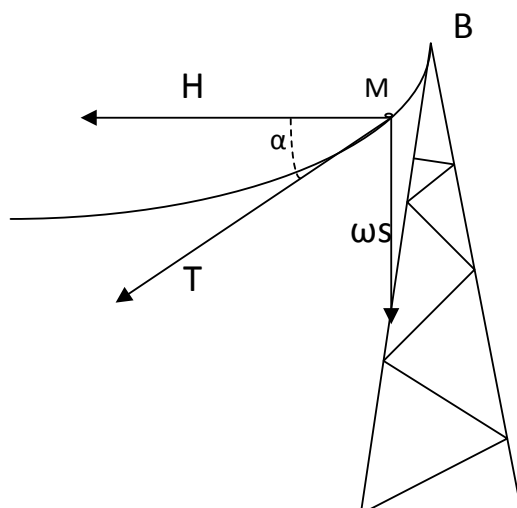


Figura A-2 - Segmento do cabo

Tendo em conta a Figura A-1, onde estão representados os eixos ortogonais, e sendo o ponto M da Figura A-2, um ponto da curva, analisando as forças intervenientes, verifica-se que ao projetar a força T sobre os eixos ortogonais obtém-se:

$$T \times \cos \alpha = H \quad (\text{eq. A. 1})$$

$$T \times \sin \alpha = \omega \times s \quad (\text{eq. A. 2})$$

Onde s é o comprimento do segmento OM,  $\omega$  o peso próprio do cabo e H a componente horizontal da tração do cabo.

Igualando as equações (eq. A.1) e (eq. A.2):

$$\tan \alpha = \frac{\omega \times s}{H} \quad (\text{eq. A. 3})$$

Sendo:

$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx} = Z \quad (\text{eq. A. 4})$$

A equação (eq. A.3) pode ser transformada em:

$$Z = \frac{\omega \times s}{H} \quad (\text{eq. A. 5})$$

Derivando ambos os membros da equação (eq. A.5):

$$dZ = \frac{\omega}{H} \times ds \quad (\text{eq. A. 6})$$

Sabendo que [19]:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \times \sqrt{1 + Z^2} \quad (\text{eq. A. 7})$$

Resulta em:

$$\frac{dZ}{\sqrt{1 + Z^2}} = \frac{\omega}{H} \times dx \quad (\text{eq. A. 8})$$

Integrando a equação (eq. A.8) obtém-se:

$$Z = \sinh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) + C \quad (\text{eq. A. 9})$$

Onde C é a constante de integração. Considerando  $x=0$  e analisando a Figura A-1, verifica-se que Z é também zero pois a tangente no ponto  $x=0$  é nula. Então a constante C toma também um valor nulo. Substituindo agora Z por  $\frac{dy}{dx}$ :

$$dy = \sinh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) dx \quad (\text{eq. A. 10})$$

Integrando a equação (eq. A.10):

$$y = \frac{H}{\omega} \times \cosh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) + C \quad (\text{eq. A. 11})$$

Sendo C a constante de integração e sabendo que para  $x=0$ ,  $y=0$ , então  $C = -\frac{H}{\omega}$

$$y = \frac{H}{\omega} \times \left( \cosh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 12})$$

Definindo o parâmetro da catenária, P como sendo:

$$P = \frac{H}{\omega} \quad (\text{eq. A. 13})$$

A equação (eq. A.12) pode ser reescrita como:

$$y = P \times \left( \cosh\left(\frac{x}{P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 14})$$

A equação (eq. A.14) apesar de não ser muito extensa, possui um cosseno hiperbólico, o que torna os cálculos mais complexos. Como foi referido no Capítulo 2 é possível utilizar a aproximação da catenária a uma parábola de forma a simplificar o cálculo.

Desenvolvendo o cosseno hiperbólico numa série de Mac-Laurin [11]:

$$y = P \times \left( 1 + \frac{x^2}{2! P^2} + \frac{x^4}{4! P^4} + \dots \right) - P \quad (\text{eq. A. 15})$$

Nas redes de distribuição o valor do parâmetro da catenária toma valor sempre elevados, da ordem dos milhares, o que leva a que seja possível considerar apenas os dois primeiros termos da série.

$$y = \frac{x^2}{2P^2} \quad (\text{eq. A. 16})$$

### Comprimento do cabo

Substituindo na equação (eq. A.5), Z por  $\frac{dy}{dx}$ , e resolvendo esta em ordem a s:

$$s = \frac{H}{\omega} \frac{dy}{dx} \quad (\text{eq. A. 17})$$

Da equação (eq. A.10) sabe-se que:

$$\frac{dy}{dx} = \sinh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) \quad (\text{eq. A. 18})$$

Substituindo equação (eq. A.18) na equação (eq. A.17):

$$s = \frac{H}{\omega} \times \sinh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) \quad (\text{eq. A. 19})$$

Ou

$$s = P \times \sinh\left(\frac{x}{P}\right) \quad (\text{eq. A. 20})$$

Onde  $x$  é a abcissa do ponto considerado.

À semelhança do que se verificava na equação (eq. A.14), a presença do seno hiperbólico torna o cálculo mais complexo. De forma simplificar o mesmo, vai ser utilizado o mesmo método que foi aplicado anteriormente.

$$s = P \times \left( \frac{x}{P} + \frac{x^3}{3!P^3} + \frac{x^5}{5!P^5} + \dots \right) \quad (\text{eq. A. 21})$$

Considerando apenas os dois primeiros termos, pois a partir destes os valores já são da ordem das décimas, obtém-se:

$$s = x \times \left( 1 + \frac{x^2}{6P^2} \right) \quad (\text{eq. A. 22})$$

### Flecha

Visto o caso em análise serem dois vãos em patamares, onde se despreza o deslocamento do cabo provocado pelo vento, a flecha máxima verifica-se para  $x = \frac{L}{2}$ .

Substituindo na equação (eq. A.14), a variável  $x$  por  $L/2$  obtém-se:

$$y = \frac{H}{\omega} \times \left( \cosh\left(\frac{\omega L}{2H}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 23})$$

Ou

$$y = P \times \left( \cosh\left(\frac{L}{2P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 24})$$

Utilizando a aproximação através da curva parabólica o resultado é:

$$y = \frac{L^2}{8P^2} \quad (\text{eq. A. 25})$$

### Tração Mecânica

Como demonstrado anteriormente, equação da catenária é dada pela equação (eq. A.12), trabalhando esta, é possível obter a seguinte equação:

$$\omega y + H = H \times \cosh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) \quad (\text{eq. A. 26})$$

Analisando a Figura A-2 e a equação (eq. A.26) verifica-se que:

$$\omega y + H = T \quad (\text{eq. A. 27})$$

Logo:

$$T = H \times \cosh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right) \quad (\text{eq. A. 28})$$

Onde caso se substitua a variável  $x$  pela abcissa corresponde aos apoios, é possível obter a tração aplicada sobre os mesmos.

### Ângulo num ponto da curva

Através da equação (eq. A.4) e da equação (eq. A.10), é possível obter de forma simples o valor do ângulo num determinado ponto de abcissa  $x$ .

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\sinh\left(\frac{\omega}{H} \times x\right)\right) \quad (\text{eq. A. 29})$$



## Vão em Declive

Na Figura A-3 está representada uma situação de um vão com os suportes a diferentes alturas.

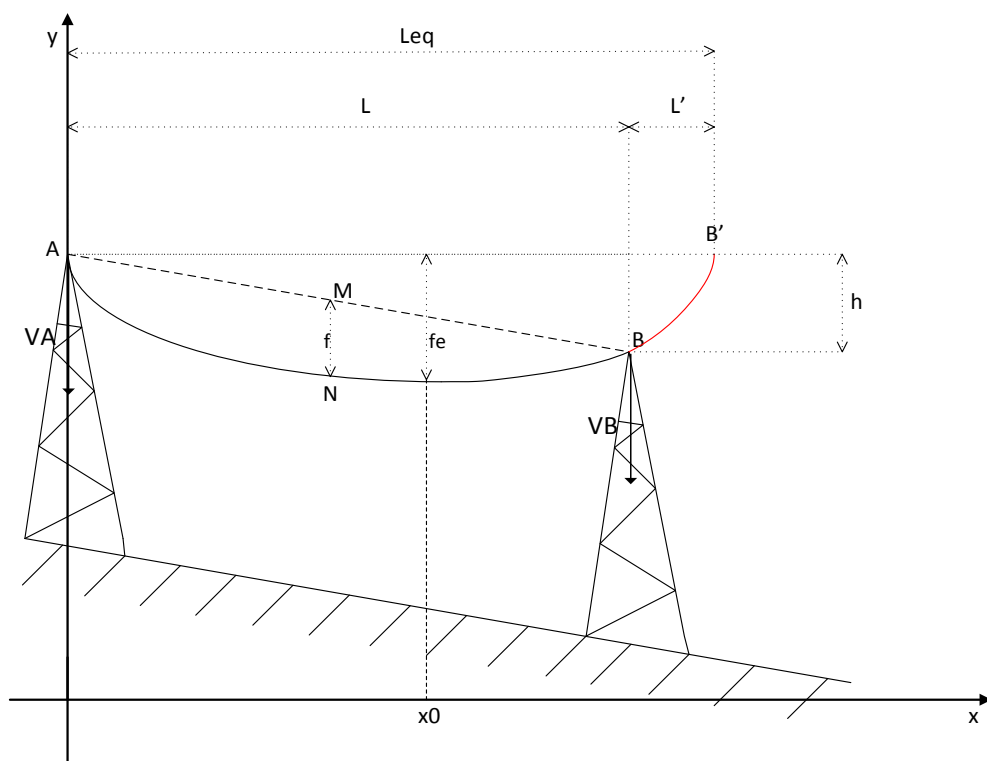


Figura A-3 - Vão em declive

Como já foi referido, o comportamento da curva catenária é reproduzido através da equação (eq. A.14). Esta, é independente do facto dos apoios se encontrarem no mesmo patamar ou em patamares diferentes.

Então para os pontos A e B respetivamente, a equação da catenária é:

$$y_A = P \times \left( \cosh\left(\frac{x_A}{P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 30})$$

$$y_B = P \times \left( \cosh\left(\frac{x_B}{P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 31})$$

Seja h a diferença de altura entre os pontos de suporte da linha. Então, e analisando a Figura A-3, h é dado por:

$$h = y_A - y_B (=) \quad (\text{eq. A. 32a})$$

$$h = P \times \left( \cosh\left(\frac{x_B}{P}\right) - \cosh\left(\frac{x_A}{P}\right) \right) (=) \quad (\text{eq. A. 32b})$$

Através da aplicação das propriedades das funções hiperbólicas, a equação (eq. A.32.b) pode ser transformada em [11]:

$$h = 2 \times P \times \sinh\left(\frac{x_A + x_B}{2 \times P}\right) \times \sinh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right) \quad (\text{eq. A. 33})$$

### Comprimento do Cabo

A equação para determinar o comprimento do cabo é obtido através da integração um bocado infinitesimal de cabo, ds:

$$S = \int_{x_A}^{x_B} ds \quad (\text{eq. A. 34})$$

Com as relações utilizadas nas equações (eq. A.7) e (eq. A.18), a equação anterior pode ser transformada da seguinte forma:

$$S = \int_{x_A}^{x_B} \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{P}\right)} dx \quad (\text{eq. A. 35})$$

Tendo em conta a relação do cosseno hiperbólico com o seno hiperbólico, obtém-se:

$$S = \int_{x_A}^{x_B} \cosh\left(\frac{x}{P}\right) dx \quad (\text{eq. A. 36})$$

Integrando a equação (eq. A.36)

$$S = P \times \left( \sinh \frac{x_B}{P} - \sinh \frac{x_A}{P} \right) \quad (\text{eq. A. 37})$$

E aplicando as propriedades das funções hiperbólicas:

$$S = 2 \times P \times \cosh\left(\frac{x_A + x_B}{2 \times P}\right) \times \sinh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right) \quad (\text{eq. A. 38})$$

As equações (eq. A.37) e (eq. A.38) já permitem calcular o comprimento do cabo quando se está na presença de um vão em declive. Apesar disso é possível, trabalhando a equação (eq. A.38), obter um equação que relacione o comprimento com a diferença de alturas.

Elevando ambos os membros da equação ao quadrado obtém-se:

$$S^2 = \cosh^2\left(\frac{x_A + x_B}{2 \times P}\right) \times \left(2 \times P \times \sinh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right)\right)^2 \quad (\text{eq. A. 39})$$

Considerando que:

$$\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1 \quad (\text{eq. A. 40})$$

Então a equação (eq. A.39) é pode ser simplificada utilizando a equação (eq. A.40), o que resulta em:

$$S^2 = \sinh^2\left(\frac{x_A + x_B}{2 \times P}\right) \times \left(2 \times P \times \sinh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right)\right)^2 + \left(2 \times P \times \sinh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right)\right)^2 \quad (\text{eq. A. 41})$$

Fazendo uso da equação (eq. A.33), resulta:

$$S = \sqrt{h^2 + \left(2 \times P \times \sinh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right)\right)^2} \quad (\text{eq. A. 42})$$

Observando a Figura A.3, verifica-se que  $x_B - x_A = L$ , logo:

$$S = \sqrt{h^2 + \left(2 \times P \times \sinh\left(\frac{L}{2 \times P}\right)\right)^2} \quad (\text{eq. A. 43})$$

Através da equação (eq. A.43) é possível então, calcular o comprimento total do cabo, em função da distância entre os apoios e da diferença de alturas.

Flecha

Seja a flecha  $f$  definida como a distância entre o ponto M, correspondente ao ponto médio entre os apoios A e B, e o ponto N da curva catenária. Então:

$$f = \overline{MN} = \frac{y_B + y_A}{2} - y_N \quad (\text{eq. A. 44})$$

Tendo em conta que  $y_A$  e  $y_B$  já foram deduzidos nas equações (eq. A.30) e (eq. A.31) respetivamente só falta determinar  $y_N$ . Utilizando a equação da catenária (eq. A.14), resulta:

$$y_N = P \times \left( \cosh\left(\frac{x_N}{P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 45})$$

Substituindo na equação (eq. A.44):

$$f = \frac{1}{2} \times \left( P \times \cosh\left(\frac{x_B}{P}\right) - P + P \times \cosh\left(\frac{x_A}{P}\right) - P \right) - \left( P \times \cosh\left(\frac{x_N}{P}\right) - P \right) \quad (\text{eq. A. 46})$$

Trabalhando sobre a equação (eq. A.46):

$$f = \frac{P}{2} \times \left( \cosh\left(\frac{x_B}{P}\right) + \cosh\left(\frac{x_A}{P}\right) \right) - P \times \cosh\left(\frac{x_N}{P}\right) \quad (\text{eq. A. 47})$$

Fazendo uso das propriedades das funções trigonométricas e sendo  $x_M$  o ponto médio do segmento  $\overline{AB}$  definido por:

$$x_M = \frac{x_B + x_A}{2} \quad (\text{eq. A. 48})$$

Então:

$$f = \frac{P}{2} \times \left( 2 \times \cosh\left(\frac{x_M}{P}\right) \times \cosh\left(\frac{x_B - x_A}{2 \times P}\right) \right) - P \times \cosh\left(\frac{x_N}{P}\right) \quad (\text{eq. A. 49})$$

Colocando em evidência o parâmetro P:

$$f = P \times \left( \cosh\left(\frac{x_M}{P}\right) \times \cosh\left(\frac{L}{2 \times P}\right) - \cosh\left(\frac{x_N}{P}\right) \right) \quad (\text{eq. A. 50})$$

Como  $x_M = x_N$ , então:

$$f = P \times \cosh\left(\frac{x_M}{P}\right) \left( \cosh\left(\frac{L}{2 \times P}\right) - 1 \right) \quad (\text{eq. A. 51})$$

Determinar a abscissa do ponto mais baixo da catenária

Seja o ponto  $x_0$  da Figura A.4 o ponto mais baixo da catenária, é possível dividir a catenária em duas seções,  $s_1$  e  $s_2$  para efeitos de análise.

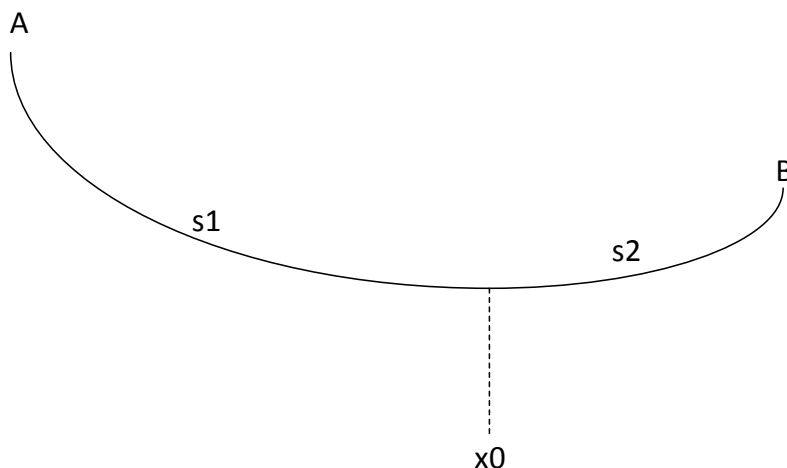


Figura A-4 - Ponto mais baixo da catenária

Pela análise da Figura A-4, as equações das secções s1 e s2 são respetivamente:

$$y_1 = P \times \left( \cosh \left( \frac{x_A - x_0}{P} \right) - 1 \right) + y_0 \quad (eq. A. 52)$$

$$y_2 = P \times \left( \cosh \left( \frac{x_B - x_0}{P} \right) - 1 \right) + y_0 \quad (eq. A. 53)$$

Subtraindo as equações (eq. A.52) e (eq. A.53):

$$y_2 - y_1 = P \times \left( \cosh \left( \frac{x_B - x_0}{P} \right) - \cosh \left( \frac{x_A - x_0}{P} \right) \right) \quad (eq. A. 54)$$

Através das propriedades das funções hiperbólicas e sendo  $y_2 - y_1 = h$ ,

$$h = 2 \times P \times \sinh \left( \frac{x_A + x_B - 2 \times x_0}{2 \times P} \right) \times \sinh \left( \frac{x_B - x_A}{2 \times P} \right) \quad (eq. A. 55)$$

E  $x_H$  o comprimento de metade do vão:

$$x_H = \frac{x_B - x_A}{2} \quad (eq. A. 56)$$

Resolvendo a equação (eq. A.55) em ordem a  $x_0$ :

$$x_0 = x_m - P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{x_H}{P} \right)} \right) \quad (eq. A. 57)$$

Considerando que o suporte A encontra-se na origem do referencial, ou seja, que a abcissa  $x_A$  tem valor nulo:

$$x_0 = \frac{L}{2} - P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{L}{2 \times P} \right)} \right) \quad (eq. A. 58)$$

Com base no resultado da equação já é possível calcular a altura do ponto mais baixo da catenária,  $y_0$ :

$$y_0 = P \times \left( \cosh \left( \frac{x_0}{P} \right) - 1 \right) \quad (eq. A. 59)$$

Comprimento do vão complementar,  $Leq$ .

Seja B' o ponto obtido quando se prolonga a curva catenária, de forma a obter um vão nivelado.

Analisando a Figura A-3 é fácil de perceber que o valor de  $Leq$  é obtido da seguinte forma:

$$Leq = L + L' \quad (eq. A. 60)$$

Ou, e de acordo com a Figura A-4,  $Leq = 2 \times |x_0|$  [19]:

$$Leq = L + 2 \times P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{x_H}{P} \right)} \right) \quad (eq. A. 61)$$

Utilizando uma aproximação parabólica [11]:

$$Leq = L + \frac{2 \times P \times h}{L} = L + \frac{2 \times H \times h}{L \times \omega} \quad (eq. A. 62)$$

Onde, tendo em conta a equação (eq. A.60), é possível retirar que:

$$L' = 2 \times P \times \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2 \times P \times \sinh \left( \frac{x_H}{P} \right)} \right) \quad (eq. A. 63)$$

Ou,

$$L' = \frac{2 \times P \times h}{L} \quad (eq. A. 64)$$

## Anexo B

# Dedução da Equação de Estados e Vão Equivalente

### Equação dos Estados

Quando ocorre uma variação de temperatura, ou seja quando se passa do estado  $j$  para o estado  $k$ , o condutor vai sofrer um alongamento térmico e elástico. O alongamento térmico provocado por esta variação é dado pela seguinte equação [16]:

$$\Delta S_{\theta} = \alpha \times S_j \times (\theta_k - \theta_j) \quad (\text{eq. B. 1})$$

Onde  $\theta_k$  e  $\theta_j$  são as temperaturas nos estados  $j$  e  $k$  e  $S_j$  o comprimento do cabo no estado  $j$ . Já o alongamento elástico provocado pela variação da tensão é dado por [16]:

$$\Delta S_e = S_j \times \frac{(T_k - T_j)}{E \times \sigma} \quad (\text{eq. B. 2})$$

Sendo  $T_k$  e  $T_j$  as trações nos estados  $j$  e  $k$  respetivamente. Somando as duas equações anteriores obtém-se o alongamento total:

$$\Delta S_T = \alpha \times S_j \times (\theta_k - \theta_j) + S_j \times \frac{(T_k - T_j)}{E \times \sigma} \quad (\text{eq. B. 3})$$

Tendo em conta que:

$$S_k = S_j + \Delta S_T \quad (\text{eq. B. 4})$$

Então

$$S_k - S_j = S_j \times \left[ \alpha \times (\theta_k - \theta_j) + \frac{(T_k - T_j)}{E \times \sigma} \right] \quad (\text{eq. B. 5})$$

Sabendo que através aproximação parabólica demonstrada no anexo A:

$$S = L + \frac{\omega^2 \times L^3}{24 \times T^2} \quad (\text{eq. B. 6})$$

E considerando que

$$t = T/\sigma \quad (\text{eq. B. 7})$$

Sendo  $t$  a tração mecânica por unidade de comprimento

$E$ , introduzindo o coeficiente de sobrecarga e considerando  $L \approx S_j$  e sendo igual nos dois estados

$$S = L + \frac{\omega^2 \times m^2 \times L^3}{24 \times \sigma^2 \times t^2} \quad (\text{eq. B. 8})$$

Substituindo nas equações (eq. B.3) e (eq. B.4):

$$\frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \sigma^2 \times t_k^2} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \sigma^2 \times t_j^2} = \alpha \times (\theta_k - \theta_j) + \frac{(t_k - t_j)}{E} \quad (\text{eq. B. 9})$$

(=)

$$\frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \sigma^2 \times t_k^2} - \theta_k \times \alpha - \frac{t_k}{E} = \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \sigma^2 \times t_j^2} - \theta_j \times \alpha - \frac{t_j}{E} \quad (\text{eq. B. 10})$$

Dividindo ambos os membros por  $\alpha$ :

$$\frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} - \theta_k - \frac{t_k}{E \times \alpha} = \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2} - \theta_j - \frac{t_j}{E \times \alpha} \quad (\text{eq. B. 11})$$

(=)

$$\theta_k + \frac{t_k}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} = \theta_j + \frac{t_j}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_j^2} \quad (\text{eq. B. 12})$$

## Vão Crítico

Como sabemos no vão crítico a tensão nos dois estado é igual, logo  $t_k = t_j = t$  e  $L_{cr} = L$ ;

$$\theta_k + \frac{t}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_k^2 \times L_{cr}^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t^2} = \theta_j + \frac{t}{E \times \alpha} - \frac{\omega^2 \times m_j^2 \times L_{cr}^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t^2} \quad (\text{eq. B. 13})$$

Trabalhando a equação

$$\frac{\omega^2 \times L_{cr}^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t^2} (m_k^2 - m_j^2) = \theta_k - \theta_j \quad (\text{eq. B. 14})$$

(=)

$$L_{cr} = \sqrt{\frac{(\theta_k - \theta_j) \times 24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t^2}{(m_k^2 - m_j^2) \times \omega^2}} = \frac{\sigma \times t}{\omega} \times \sqrt{\frac{(\theta_k - \theta_j) \times 24 \times \alpha}{(m_k^2 - m_j^2)}} \quad (\text{eq. B. 15})$$

## Vão Equivalente

Sendo a equação dos estados dada pela equação (eq. B.12), multiplicando por  $\alpha$  ambos os membros da mesma e não considerando os coeficientes de sobrecarga, obtém-se:

$$\alpha \times (\theta_j - \theta_k) + \frac{t_j - t_k}{E} = \frac{\omega^2 \times L^2}{24} \times \left( \frac{1}{t_j^2} - \frac{1}{t_k^2} \right) \quad (\text{eq. B. 16})$$

Multiplicando agora por  $L$  os dois membros:

$$L \times \left( \alpha \times (\theta_j - \theta_k) + \frac{t_j - t_k}{E} \right) = \frac{\omega^2 \times L^3}{24} \times \left( \frac{1}{t_j^2} - \frac{1}{t_k^2} \right) \quad (\text{eq. B. 17})$$

Tendo em conta a relação da equação (eq. B.6), é possível escrever que a variação do comprimento do cabo devido á variação de temperatura e correspondente variação de tração, é otida pela seguinte relação:

$$S_2 - S_1 = \frac{\omega^2 \times L^3}{24} \times \left( \frac{1}{t_2^2} - \frac{1}{t_1^2} \right) \quad (\text{eq. B. 18})$$

Analisando a equação (eq. B.18) verifica-se que esta é equivalente ao segundo membro da equação (eq. B.17). Ou seja:

$$S_2 - S_1 = \frac{\omega^2 \times L^3}{24} \times \left( \frac{1}{t_2^2} - \frac{1}{t_1^2} \right) = L \times \left( \alpha \times (\theta_j - \theta_k) + \frac{t_j - t_k}{E} \right) \quad (\text{eq. B. 19})$$

Generalizando agora a equação (eq. B.19):

$$\sum (S_2 - S_1) = \frac{\sum L_i^3 \times \omega^2}{24} \times \left( \frac{1}{t_2^2} - \frac{1}{t_1^2} \right) = \sum L_i \times \left( \alpha \times (\theta_j - \theta_k) + \frac{t_j - t_k}{E} \right) \quad (\text{eq. B. 20})$$

Ou:

$$\sum (S_2 - S_1) = \frac{\sum L_i^3}{\sum L_i} \times \frac{\omega^2}{24} \times \left( \frac{1}{t_2^2} - \frac{1}{t_1^2} \right) = \left( \alpha \times (\theta_j - \theta_k) + \frac{t_j - t_k}{E} \right) \quad (\text{eq. B. 21})$$

Comparando a equação (eq. B.21) com a equação (eq. B.16), conclui-se que:

$$\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i} = L_{eq}^2 (=) L_{eq} = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} \quad (\text{eq. B. 22})$$



## Anexo C

# Movimento das Cadeias de Isoladores nas Situações de Cantão em Patamar

### Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores em Suspensão

Tabela C-1 - Movimento Transversal na Situação de Patamar.

Vão 1	Vão 2	%	$F_{v_{cond}}$	$F_{v_{isol}}$	Pc	$\Theta$	$\Delta x$	Distância entre apoio e condutores.
[m]	[m]		[daN]	[daN]	[daN]	[°]	[m]	[m]
300	400	25	181.44	8	252.7	35.59	0.6984	0.802
120	130	7.69	64.8	8	90.25	35.45	0.696	0.804
120	150	20	69.984	8	97.47	35.465	0.6963	0.804

120	250	52	95.904	8	133.57	35.518	0.6972	0.803
250	120	52	95.904	8	133.57	35.518	0.6972	0.803
300	300	0	155.52	8	216.6	35.577	0.6981	0.802
300	600	50	233.28	8	324.9	35.609	0.6987	0.801
500	100	80	155.52	8	216.6	36.301	0.7104	0.790
500	900	44.44	362.88	8	505.4	35.634	0.6991	0.801
800	800	0	414.72	8	577.6	35.639	0.6992	0.801
800	100	87.50	233.28	8	324.9	35.609	0.6987	0.801
800	1000	20	466.56	8	649.8	35.643	0.6993	0.801
900	1200	25	544.32	8	758.1	35.648	0.6994	0.801
900	1300	30.77	622.08	8	866.4	35.838	0.7026	0.797

## Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores em Suspensão

- Comprimento da cadeia de isoladores igual 1.2 metros e uma tolerância de movimento de 10 % do seu comprimento

Tabela C-2 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 1.2 metros, e uma tolerância de movimento de 10% do seu comprimento.

Vão AB	Vão BC	$t_m$ a 20°	Tração - vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]	Tração - vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta x$ [m]
-----------	-----------	----------------	---	---	-------------------

[m]	[m]	[daN/mm <sup>2</sup> ]	-5°	20°	80°	-5°	20°	80°	-5°	20°	80°
200	200	8.860	11.678	8.860	4.845	11.678	8.860	4.845	0.000	0.000	0.000
120	122	8.555	11.868	8.555	3.545	11.856	8.555	3.580	-0.033	0.000	0.097
140	143	8.630	11.827	8.630	3.908	11.814	8.630	3.940	-0.031	0.000	0.077
150	152	8.669	11.805	8.669	4.079	11.791	8.669	4.110	-0.030	0.000	0.069
160	162	8.708	11.782	8.708	4.244	11.768	8.708	4.273	-0.029	0.000	0.062
180	182	8.786	11.733	8.786	4.556	11.719	8.786	4.583	-0.027	0.000	0.051
200	203	8.866	11.685	8.866	4.848	11.663	8.866	4.885	-0.037	0.000	0.064
250	254	8.963	11.438	8.963	5.458	11.409	8.963	5.500	-0.040	0.000	0.057
300	307	8.479	10.442	8.479	5.717	10.393	8.479	5.774	-0.056	0.000	0.066
350	360	8.114	9.623	8.114	5.915	9.566	8.114	5.980	-0.057	0.000	0.063
400	414	7.844	9.000	7.844	6.069	8.938	7.844	6.139	-0.053	0.000	0.061
450	470	7.643	8.539	7.643	6.188	8.474	7.643	6.267	-0.050	0.000	0.061
500	528	7.493	8.200	7.493	6.281	8.133	7.493	6.370	-0.046	0.000	0.061
550	585	7.381	7.952	7.381	6.358	7.890	7.381	6.447	-0.039	0.000	0.055
600	652	7.288	7.756	7.288	6.416	7.687	7.288	6.521	-0.039	0.000	0.059
650	720	7.216	7.607	7.216	6.465	7.537	7.216	6.578	-0.036	0.000	0.059
700	800	7.155	7.486	7.155	6.502	7.410	7.155	6.631	-0.036	0.000	0.061
750	880	7.107	7.391	7.107	6.534	7.315	7.107	6.671	-0.033	0.000	0.059
800	975	7.066	7.312	7.066	6.559	7.232	7.066	6.707	-0.032	0.000	0.059
850	1115	7.022	7.237	7.022	6.573	7.148	7.022	6.745	-0.032	0.000	0.062
900	1250	6.991	7.180	6.991	6.589	7.090	6.991	6.769	-0.030	0.000	0.059

- Comprimento da cadeia de isoladores igual 0.6 metros e uma tolerância de movimento de 10 % do seu comprimento

Tabela C-3 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 0.6 metros, e uma tolerância de movimento de 10% do seu comprimento.

Vão AB [m]	Vão BC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	Tração - vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração - vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta x$ [m]		
			-5°	20°	80°	-5°	20°	80°	-5°	20°	80°
200	200	8.860	11.678	8.860	4.845	11.678	8.860	4.845	0.000	0.000	0.000
120	125	8.561	11.875	8.561	3.546	11.801	8.561	3.634	-0.099	0.000	0.118
140	143	8.632	11.829	8.632	3.909	11.810	8.632	3.957	-0.024	0.000	0.057
150	155	8.675	11.812	8.675	4.081	11.778	8.675	4.158	-0.038	0.000	0.084
160	165	8.714	11.789	8.714	4.246	11.754	8.714	4.319	-0.036	0.000	0.076
180	185	8.792	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.034	0.000	0.063
200	210	8.880	11.702	8.880	4.853	11.629	8.880	4.976	-0.061	0.000	0.102
200	205	8.870	11.690	8.870	4.849	11.653	8.870	4.911	-0.031	0.000	0.053
250	260	8.930	11.396	8.930	5.445	11.323	8.930	5.547	-0.050	0.000	0.069
300	313	8.454	10.408	8.454	5.705	10.318	8.454	5.810	-0.051	0.000	0.059
350	370	8.083	9.581	8.083	5.900	9.468	8.083	6.025	-0.055	0.000	0.061
400	430	7.807	8.950	7.807	6.048	8.824	7.807	6.195	-0.053	0.000	0.062
450	490	7.609	8.495	7.609	6.167	8.372	7.609	6.320	-0.046	0.000	0.057
500	560	7.452	8.149	7.452	6.255	8.018	7.452	6.433	-0.043	0.000	0.059
550	625	7.342	7.905	7.342	6.332	7.784	7.342	6.508	-0.036	0.000	0.053
600	725	7.234	7.693	7.234	6.378	7.553	7.234	6.599	-0.037	0.000	0.059

650	825	7.156	7.538	7.156	6.420	7.397	7.156	6.659	-0.034	0.000	0.057
700	1000	7.071	7.391	7.071	6.437	7.230	7.071	6.727	-0.034	0.000	0.060
750	1200	7.009	7.282	7.009	6.456	7.117	7.009	6.768	-0.030	0.000	0.057
800	1400	7.022	7.237	7.022	6.573	7.148	7.022	6.745	-0.032	0.000	0.062

- Comprimento da cadeia de isoladores igual 1.2 metros e uma tolerância de movimento de 5 % do seu comprimento

Tabela C-4 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 1.2 metros, e uma tolerância de movimento de 5% do seu comprimento.

Vão AB [m]	Vão BC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	Tração - vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração - vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta x$ [m]		
			-5°	20°	80°	-5°	20°	80°	-5°	20°	80°
200	200	8.860	11.678	8.860	4.845	11.678	8.860	4.845	0.000	0.000	0.000
120	122	8.555	11.868	8.555	3.545	11.856	8.555	3.580	-0.033	0.000	0.097
140	143	8.630	11.827	8.630	3.908	11.814	8.630	3.940	-0.031	0.000	0.077
150	152	8.669	11.805	8.669	4.079	11.791	8.669	4.110	-0.030	0.000	0.069
160	162	8.708	11.782	8.708	4.244	11.768	8.708	4.273	-0.029	0.000	0.062
180	182	8.786	11.733	8.786	4.556	11.719	8.786	4.583	-0.027	0.000	0.051
200	203	8.866	11.685	8.866	4.848	11.663	8.866	4.885	-0.037	0.000	0.064
250	254	8.963	11.438	8.963	5.458	11.409	8.963	5.500	-0.040	0.000	0.057
300	307	8.479	10.442	8.479	5.717	10.393	8.479	5.774	-0.056	0.000	0.066
350	360	8.114	9.623	8.114	5.915	9.566	8.114	5.980	-0.057	0.000	0.063
400	414	7.844	9.000	7.844	6.069	8.938	7.844	6.139	-0.053	0.000	0.061

450	470	7.643	8.539	7.643	6.188	8.474	7.643	6.267	-0.050	0.000	0.061
500	528	7.493	8.200	7.493	6.281	8.133	7.493	6.370	-0.046	0.000	0.061
550	585	7.381	7.952	7.381	6.358	7.890	7.381	6.447	-0.039	0.000	0.055
600	652	7.288	7.756	7.288	6.416	7.687	7.288	6.521	-0.039	0.000	0.059
650	720	7.216	7.607	7.216	6.465	7.537	7.216	6.578	-0.036	0.000	0.059
700	800	7.155	7.486	7.155	6.502	7.410	7.155	6.631	-0.036	0.000	0.061
750	880	7.107	7.391	7.107	6.534	7.315	7.107	6.671	-0.033	0.000	0.059
800	975	7.066	7.312	7.066	6.559	7.232	7.066	6.707	-0.032	0.000	0.059
850	1115	7.022	7.237	7.022	6.573	7.148	7.022	6.745	-0.032	0.000	0.062

- Comprimento da cadeia de isoladores igual 0.6 metros e uma tolerância de movimento de 5 % do seu comprimento

Tabela C-5 - Movimento Longitudinal em situação de patamar de uma cadeia de isoladores com 0.6 metros, e uma tolerância de movimento de 5% do seu comprimento.

Vão AB [m]	Vão BC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	Tração - vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração - vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta x$ [m]		
			-5°	20°	80°	-5°	20°	80°	-5°	20°	80°
200	200	0.000	8.860	11.678	8.860	4.845	11.678	8.860	0.000	0.000	0.000
120	125	4.000	8.555	11.868	8.555	3.545	11.856	8.555	4.656	-0.017	0.000
140	143	2.143	8.630	11.827	8.630	3.908	11.814	8.630	3.677	-0.016	0.000
150	155	3.333	8.669	11.805	8.669	4.079	11.791	8.669	3.298	-0.015	0.000
160	165	3.125	8.708	11.782	8.708	4.244	11.768	8.708	2.973	-0.015	0.000
180	185	2.778	8.786	11.733	8.786	4.556	11.719	8.786	2.449	-0.014	0.000
200	210	5.000	8.866	11.685	8.866	4.848	11.663	8.866	3.056	-0.019	0.000

200	205	2.439	8.963	11.438	8.963	5.458	11.409	8.963	2.712	-0.020	0.000
250	260	3.846	8.479	10.442	8.479	5.717	10.393	8.479	3.134	-0.028	0.000
300	313	4.153	8.114	9.623	8.114	5.915	9.566	8.114	3.025	-0.028	0.000
350	370	5.405	7.844	9.000	7.844	6.069	8.938	7.844	2.916	-0.027	0.000
400	430	6.977	7.643	8.539	7.643	6.188	8.474	7.643	2.912	-0.025	0.000
450	490	8.163	7.493	8.200	7.493	6.281	8.133	7.493	2.897	-0.023	0.000
500	560	10.714	7.381	7.952	7.381	6.358	7.890	7.381	2.635	-0.019	0.000
550	625	12.000	7.288	7.756	7.288	6.416	7.687	7.288	2.829	-0.019	0.000
600	725	17.241	7.216	7.607	7.216	6.465	7.537	7.216	2.803	-0.018	0.000
650	825	21.212	7.155	7.486	7.155	6.502	7.410	7.155	2.923	-0.018	0.000
700	1000	30.000	7.107	7.391	7.107	6.534	7.315	7.107	2.834	-0.017	0.000
750	1200	37.500	7.066	7.312	7.066	6.559	7.232	7.066	2.815	-0.016	0.000
800	1400	42.857	7.022	7.237	7.022	6.573	7.148	7.022	2.969	-0.016	0.000

## **Anexo D**

# **Movimento das Cadeias de Isoladores nas Situações de Cantão em Declive**

### **Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores em Suspensão**

Nestes cálculos foi considerado um braço com o comprimento de aproximadamente 1,5 metros. O objetivo é garantir uma distância de pelo menos 0,7 metros entre o condutor e o apoio. Como tal o desvio máximo é de cerca de 0.8 metros. Nas situações em que este aparece com sinal negativo significa que, a força sobre este tem sentido ascendente.

- Situação a)



Tabela D-1 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação a).

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAB [m]	hBC [m]	$F_{v_{cond}}$ + $F_{v_{isol}}$ [daN]	VB [daN]			$\Theta$ [°]			$\Delta x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	130	0	5	64.8	-30.522	-1.690	51.705	-71.384	86.611	51.598	-1.137	1.198	0.940
120	135	0	5	66.096	-24.114	3.571	54.575	-76.262	82.640	50.733	-1.166	1.190	0.929
120	200	0	5	82.944	38.747	56.415	86.628	63.801	55.538	44.474	1.077	0.989	0.841
120	425	0	5	141.264	165.039	170.286	178.333	41.111	40.255	38.999	0.789	0.775	0.755
120	500	0	10	160.704	172.242	179.441	190.760	43.425	42.294	40.610	0.825	0.808	0.781
200	210	0	5	106.272	76.118	92.153	118.525	54.298	49.339	42.541	0.974	0.910	0.811
200	275	0	5	123.12	117.934	129.273	147.215	46.614	44.107	40.557	0.872	0.835	0.780
200	500	0	10	181.44	200.644	208.202	220.002	42.513	41.490	39.970	0.811	0.795	0.771
300	500	0	10	207.36	236.744	244.302	256.102	41.579	40.709	39.409	0.796	0.783	0.762
300	200	0	10	129.6	35.047	65.014	111.839	73.390	62.702	49.424	1.150	1.066	0.911
300	700	0	10	259.2	326.703	329.947	335.504	38.769	38.497	38.040	0.751	0.747	0.739
300	700	0	20	259.2	292.411	298.901	310.015	41.842	41.230	40.216	0.800	0.791	0.775
300	800	0	25	285.12	324.202	329.737	339.692	41.595	41.123	40.295	0.797	0.789	0.776
400	200	0	10	155.52	78.903	103.345	140.680	62.561	56.230	48.107	1.065	0.998	0.893
400	200	0	7	155.52	120.189	137.304	163.448	52.343	48.770	43.980	0.950	0.902	0.833
400	800	0	28	311.04	351.401	357.718	369.038	41.754	41.256	40.387	0.799	0.791	0.778
500	600	0	28	285.12	282.804	295.090	315.521	45.425	44.232	42.354	0.855	0.837	0.808
500	750	0	28	324	363.195	370.517	383.427	41.964	41.405	40.449	0.802	0.794	0.779

600	1200	0	50	466.56	558.179	561.664	568.763	40.069	39.895	39.545	0.772	0.770	0.764
600	600	0	20	311.04	352.909	360.654	373.855	41.634	41.028	40.027	0.797	0.788	0.772
200	200	0	1,5	103.68	121.684	120.907	135.210	41.175	41.348	38.340	0.790	0.793	0.744
300	300	0	4	155.52	178.706	186.067	197.389	41.518	40.410	38.798	0.795	0.778	0.752
400	400	0	8	207.36	235.593	243.997	256.949	41.714	40.743	39.318	0.799	0.783	0.760
500	500	0	14	259.2	290.591	299.314	313.365	42.016	41.191	39.918	0.803	0.790	0.770
600	600	0	20	311.04	352.909	360.654	373.855	41.634	41.028	40.027	0.797	0.788	0.772
700	700	0	30	362.88	405.383	412.966	426.603	42.036	41.516	40.607	0.804	0.795	0.781
800	800	0	40	414.72	463.592	470.496	483.494	41.993	41.578	40.813	0.803	0.796	0.784
900	900	0	50	466.56	525.304	531.432	543.412	41.771	41.445	40.819	0.799	0.794	0.784

- Situação b)

Tabela D-2 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação b)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAB [m]	hBC [m]	$F_{v_{cond}}$ + $F_{v_{isol}}$ [daN]	VB [daN]			$\Theta$ [°]			$\Delta x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	130	2	5	64.800	21.823	38.159	68.412	69.084	58.760	44.373	1.121	1.026	0.839
120	140	2	5	67.392	34.196	48.389	74.396	61.935	54.193	43.160	1.059	0.973	0.821
120	140	3	5	67.392	60.303	68.286	82.914	48.670	45.423	40.295	0.901	0.855	0.776
120	140	5	10	67.392	0.754	22.903	63.489	84.881	69.025	47.333	1.195	1.120	0.882
120	140	8	10	67.392	78.976	82.518	89.011	41.580	40.421	38.432	0.796	0.778	0.746
120	200	5	10	82.944	89.961	95.847	105.919	43.462	41.763	39.097	0.825	0.799	0.757

120	200	30	10	82.944	721.764	582.411	344.484	7.123	8.786	14.546	0.149	0.183	0.301
120	200	10	9	82.944	233.011	205.984	159.782	20.832	23.220	28.748	0.427	0.473	0.577
200	400	15	30	155.520	216.671	216.686	216.728	36.292	36.290	36.285	0.710	0.710	0.710
200	400	15	50	155.520	79.617	104.002	141.282	62.364	56.071	47.991	1.063	0.996	0.892
200	400	30	50	155.520	284.943	272.862	254.440	29.337	30.387	32.123	0.588	0.607	0.638
200	600	12	30	207.360	313.725	310.895	306.276	33.963	34.200	34.592	0.670	0.674	0.681
200	600	8	30	207.360	264.140	267.009	271.717	38.562	38.268	37.792	0.748	0.743	0.735
300	100	20	10	103.680	47.690	67.589	98.661	64.324	56.618	46.858	1.082	1.002	0.876
300	600	60	50	233.280	612.649	578.966	524.102	21.306	22.415	24.473	0.436	0.458	0.497
300	500	20	30	207.360	530.831	495.807	441.135	21.859	23.228	25.718	0.447	0.473	0.521
300	500	60	110	207.360	323.405	318.438	310.710	33.176	33.576	34.215	0.657	0.664	0.675
400	400	10	20	207.360	222.335	232.833	249.013	43.325	42.041	40.181	0.823	0.804	0.774
400	400	20	30	207.360	222.418	232.903	249.063	43.315	42.033	40.176	0.823	0.803	0.774
500	500	20	10	259.200	411.276	405.047	395.013	32.633	33.026	33.676	0.647	0.654	0.665
500	500	10	20	259.200	310.724	316.953	326.987	40.152	39.603	38.745	0.774	0.765	0.751
500	500	20	20	259.200	361.000	361.000	361.000	36.057	36.057	36.057	0.706	0.706	0.706
600	600	20	20	311.040	433.200	433.200	433.200	35.995	35.995	35.995	0.705	0.705	0.705
700	700	20	20	362.880	505.400	505.400	505.400	35.951	35.951	35.951	0.705	0.705	0.705
700	700	40	40	362.880	505.400	505.400	505.400	35.951	35.951	35.951	0.705	0.705	0.705
800	800	60	60	414.720	577.600	577.600	577.600	35.917	35.917	35.917	0.704	0.704	0.704
900	900	100	100	466.560	649.800	649.800	649.800	35.891	35.891	35.891	0.703	0.703	0.703
800	900	50	100	466.560	525.683	531.792	543.735	41.751	41.426	40.802	0.799	0.794	0.784

- Situação c)

Tabela D-3 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação c)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAB [m]	hBC [m]	$F_{v_{cond}}$ + $F_{v_{isol}}$ [daN]	VB [daN]			$\Theta$ [°]			$\Delta x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	140	5	0	67.392	224.385	193.337	136.451	18.120	20.717	27.890	0.373	0.425	0.561
120	140	10	0	67.392	354.682	292.642	178.975	11.806	14.168	22.175	0.246	0.294	0.453
120	140	30	0	67.392	869.194	684.805	347.167	4.923	6.228	12.050	0.103	0.130	0.251
120	200	20	0	82.944	624.952	507.788	307.583	8.202	10.038	16.173	0.171	0.209	0.334
120	100	10	0	57.024	342.221	278.987	158.727	10.577	12.853	21.541	0.220	0.267	0.441
200	300	5	0	129.600	253.251	238.262	214.839	27.958	29.394	31.926	0.563	0.589	0.635
200	300	20	0	129.600	471.012	411.175	317.686	16.091	18.254	23.031	0.333	0.376	0.469
200	500	20	0	181.440	512.666	475.022	416.265	20.064	21.496	24.162	0.412	0.440	0.491
200	800	10	0	259.200	477.255	468.897	453.719	28.939	29.364	30.166	0.581	0.588	0.603
400	200	15	0	155.520	319.866	301.517	273.477	26.648	28.002	30.332	0.538	0.563	0.606
400	400	20	0	207.360	421.771	400.768	368.399	26.723	27.899	29.908	0.540	0.561	0.598
400	600	20	0	259.200	485.010	470.746	447.401	28.554	29.269	30.512	0.574	0.587	0.609
400	600	50	0	259.200	670.268	634.750	576.600	21.559	22.637	24.638	0.441	0.462	0.500
400	800	50	0	311.040	725.095	702.711	662.595	23.576	24.236	25.510	0.480	0.493	0.517
550	120	50	0	160.704	481.356	445.378	388.816	19.094	20.493	23.137	0.393	0.420	0.472
550	700	7	0	311.040	466.654	463.619	458.376	34.019	34.191	34.490	0.671	0.674	0.680
700	120	7	0	212.544	319.711	317.680	314.123	34.103	34.269	34.564	0.673	0.676	0.681

700	700	35	0	362.880	622.074	613.228	597.320	30.562	30.919	31.580	0.610	0.617	0.628
700	700	5	0	362.880	522.074	520.810	518.537	35.081	35.146	35.263	0.690	0.691	0.693
700	900	5	0	414.720	593.848	592.903	591.113	35.173	35.215	35.296	0.691	0.692	0.693
700	1000	5	0	440.640	629.763	628.956	627.386	35.210	35.244	35.311	0.692	0.692	0.694
700	1000	2	0	440.640	620.125	619.803	619.174	35.623	35.637	35.664	0.699	0.699	0.700

- Situação d)

Tabela D-4 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação d)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAB [m]	hBC [m]	$F_{v_{cond}}$ + $F_{v_{isol}}$ [daN]	VB [daN]			$\Theta$ [°]			$\Delta x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	140	0	-5	67.392	205.747	179.131	130.363	19.598	22.158	28.937	0.403	0.453	0.581
120	140	0	-20	67.392	540.010	433.875	239.370	7.862	9.726	17.080	0.164	0.203	0.352
120	140	0	-40	67.392	977.503	767.263	381.825	4.384	5.569	11.001	0.092	0.116	0.229
120	200	0	-10	82.944	269.020	233.695	173.281	18.298	20.778	26.897	0.377	0.426	0.543
120	100	0	-10	57.024	394.616	318.780	174.580	9.219	11.321	19.803	0.192	0.236	0.407
200	300	0	-10	129.600	277.484	257.495	226.253	25.891	27.574	30.645	0.524	0.555	0.612
200	300	0	-5	129.600	228.998	219.002	203.380	30.351	31.448	33.312	0.606	0.626	0.659
200	500	0	-5	181.440	278.729	274.950	269.050	33.637	33.991	34.557	0.665	0.671	0.681
200	500	0	-30	181.440	408.800	386.128	350.731	24.546	25.786	27.970	0.499	0.522	0.563
400	200	0	-30	155.520	628.117	555.188	443.785	14.460	16.245	19.979	0.300	0.336	0.410
400	400	0	-30	207.360	488.153	456.665	408.136	23.548	24.961	27.475	0.479	0.506	0.554

400	600	0	-30	259.200	484.935	470.651	447.267	28.558	29.274	30.519	0.574	0.587	0.609
400	600	0	-15	259.200	422.984	415.842	404.149	31.917	32.351	33.083	0.634	0.642	0.655
400	800	0	-15	311.040	477.026	473.642	467.578	33.445	33.630	33.967	0.661	0.665	0.670
550	120	0	-15	173.664	555.439	516.808	454.557	17.930	19.161	21.526	0.369	0.394	0.440
550	700	0	-15	324.000	502.175	497.700	489.908	33.157	33.390	33.801	0.656	0.660	0.668
550	700	0	-5	324.000	468.226	466.734	464.137	34.995	35.080	35.229	0.688	0.690	0.692
700	120	0	-5	212.544	394.885	386.441	371.666	28.817	29.335	30.283	0.578	0.588	0.605
700	120	0	-20	212.544	689.641	656.119	597.426	17.591	18.422	20.077	0.363	0.379	0.412
700	700	0	-20	362.880	572.089	567.033	557.940	32.683	32.912	33.331	0.648	0.652	0.659
700	1000	0	-20	440.640	658.575	656.312	651.904	34.022	34.113	34.291	0.671	0.673	0.676

- Situação e)

Tabela D-5 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação e)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAB [m]	hBC [m]	$F_{v_{cond}}$ + $F_{v_{isol}}$ [daN]	VB [daN]			$\Theta$ [°]			$\Delta x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	140	-5	0	67.392	-36.665	-5.617	51.269	-67.866	89.709	52.779	-1.112	1.200	0.956
120	140	-10	0	67.392	-166.962	-104.922	8.745	-25.098	-37.312	78.934	-0.509	-0.727	1.178
140	140	-5	0	72.576	-10.391	15.970	63.529	-86.880	74.748	49.209	-1.198	1.158	0.909
140	120	-5	0	67.392	-18.027	8.589	57.357	-80.936	79.048	49.958	-1.185	1.178	0.919
140	150	-5	0	75.168	-6.524	19.679	66.534	-89.639	72.841	48.907	-1.200	1.147	0.904
140	1200	-5	0	347.328	405.360	407.848	413.027	40.820	40.649	40.297	0.784	0.782	0.776

140	1200	-10	0	347.328	327.083	332.053	342.400	46.851	46.427	45.564	0.875	0.869	0.857
200	120	-10	0	82.944	-37.980	-2.655	57.759	-70.626	87.894	54.966	-1.132	1.199	0.983
200	1500	-10	0	440.640	505.664	507.932	512.867	41.245	41.120	40.848	0.791	0.789	0.785
350	700	-10	0	272.160	310.319	316.835	327.975	41.531	40.952	39.992	0.796	0.787	0.771
350	700	-20	0	272.160	241.653	254.673	276.936	48.524	47.064	44.718	0.899	0.879	0.844
350	1500	-20	0	479.520	544.171	546.962	552.995	41.545	41.401	41.093	0.796	0.794	0.789
500	700	-20	0	311.040	337.641	346.309	361.284	42.874	42.163	40.979	0.816	0.805	0.787
500	700	-5	0	311.040	409.304	411.472	415.217	37.532	37.388	37.141	0.731	0.729	0.725
500	900	-20	0	362.880	413.693	419.461	430.232	41.467	41.079	40.371	0.795	0.789	0.777
700	800	-20	0	388.800	475.688	480.085	488.202	39.481	39.225	38.761	0.763	0.759	0.751
700	900	-30	0	414.720	480.145	485.807	496.547	41.008	40.680	40.069	0.787	0.782	0.772
700	1600	-50	0	596.160	737.798	739.807	744.166	39.086	39.010	38.847	0.757	0.755	0.753
900	900	-45	0	466.560	537.743	543.258	554.041	41.113	40.827	40.277	0.789	0.785	0.776
900	1000	-50	0	492.480	562.287	567.760	578.647	41.370	41.098	40.565	0.793	0.789	0.780
1000	1000	-60	0	518.400	589.321	594.718	605.597	41.484	41.228	40.719	0.795	0.791	0.783

- Situação f)

Tabela D-6 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação f).

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAB [m]	hBC [m]	$F_{v_{cond}}$ + $F_{v_{isol}}$ [daN]	VB [daN]			$\Theta$ [°]			$\Delta x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	130	-2	-5	64.800	158.677	142.341	112.088	23.849	26.140	31.653	0.485	0.529	0.630
120	140	-2	-5	67.392	153.524	139.331	113.324	25.296	27.419	32.286	0.513	0.553	0.641
135	140	-2	-5	71.280	164.566	149.100	121.080	24.929	27.074	31.958	0.506	0.546	0.635
120	140	-10	-20	67.392	279.172	235.087	154.298	14.809	17.365	25.189	0.307	0.358	0.511
120	140	-10	-40	67.392	716.638	568.465	296.822	5.956	7.477	13.980	0.125	0.156	0.290
120	140	-17	-20	67.392	97.548	96.668	95.049	36.058	36.291	36.726	0.706	0.710	0.718
120	140	-30	-20	67.392	-235.421	-157.108	-13.684	-18.191	-26.516	-84.181	-0.375	-0.536	-1.194
120	100	-17	-20	57.024	260.938	217.269	134.246	13.690	16.237	24.874	0.284	0.336	0.505
120	100	-30	-20	57.024	-74.578	-37.519	32.978	-43.476	-64.139	59.060	-0.826	-1.080	1.029
200	300	-28	-40	129.600	161.227	165.175	171.322	39.449	38.794	37.811	0.762	0.752	0.736
200	300	-40	-28	129.600	-126.413	-63.262	35.361	-48.811	-67.405	73.270	-0.903	-1.108	1.149
200	400	-28	-40	155.520	107.114	126.500	156.088	55.327	50.982	45.252	0.987	0.932	0.852
200	400	-28	-51	155.520	182.347	188.379	197.563	40.964	40.072	38.775	0.787	0.772	0.752
200	400	-40	-28	155.520	-137.881	-75.149	20.662	-51.113	-67.078	80.739	-0.934	-1.105	1.184
300	400	-28	-40	181.440	270.755	267.622	262.817	34.392	34.697	35.173	0.678	0.683	0.691
300	400	-28	-50	181.440	345.321	329.322	304.843	28.335	29.464	31.360	0.570	0.590	0.624
300	400	-38	-40	181.440	180.337	192.787	211.808	45.473	43.621	41.015	0.856	0.828	0.788



300	650	-38	-40	246.240	184.263	200.926	228.729	53.190	50.858	47.285	0.961	0.931	0.882
550	400	-38	-40	246.240	420.799	411.002	395.298	30.782	31.370	32.356	0.614	0.625	0.642
550	700	-38	-40	324.000	422.793	425.271	429.581	37.749	37.590	37.315	0.735	0.732	0.727
550	700	-38	-25	324.000	371.922	378.869	390.960	41.299	40.782	39.908	0.792	0.784	0.770
550	700	-10	-25	324.000	492.873	489.209	482.829	33.644	33.839	34.183	0.665	0.668	0.674
650	700	-10	-25	349.920	535.090	531.261	524.457	33.484	33.671	34.009	0.662	0.665	0.671
800	800	-75	-40	414.720	478.065	484.092	495.440	41.130	40.779	40.131	0.789	0.784	0.773
900	900	-85	-40	466.560	537.975	543.479	554.239	41.101	40.816	40.267	0.789	0.784	0.776
1000	1000	-99	-40	518.400	591.785	597.081	607.757	41.367	41.116	40.619	0.793	0.789	0.781

- Situação g)

Tabela D-7 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação g).

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAB [m]	hBC [m]	$F_{v_{cond}}$ + $F_{v_{isol}}$ [daN]	VB [daN]			$\Theta$ [°]			$\Delta x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	130	5	-5	64.800	341.854	281.787	170.553	64.800	11.820	14.196	22.408	0.246	0.294
120	140	5	-5	67.392	336.272	278.609	172.954	67.392	12.422	14.837	22.845	0.258	0.307
130	140	5	-5	69.984	329.450	274.415	174.311	69.984	13.087	15.541	23.388	0.272	0.322
120	140	20	-5	67.392	725.578	575.323	300.085	67.392	5.884	7.389	13.837	0.123	0.154
120	140	5	-20	67.392	670.539	533.354	281.951	67.392	6.359	7.957	14.672	0.133	0.166
120	100	5	-20	57.024	838.195	655.648	308.639	57.024	4.405	5.613	11.676	0.092	0.117

120	220	5	-20	82.944	550.101	450.086	279.020	82.944	9.288	11.277	17.697	0.194	0.235
120	200	20	-20	82.944	931.562	743.841	422.977	82.944	5.540	6.915	11.970	0.116	0.144
200	220	20	-20	108.864	725.389	598.221	390.346	108.864	9.078	10.947	16.428	0.189	0.228
200	220	20	-2	108.864	479.483	406.821	288.052	108.864	13.535	15.806	21.674	0.281	0.327
200	400	20	-2	155.520	505.366	454.138	375.884	155.520	17.733	19.564	23.180	0.365	0.402
200	400	20	-30	155.520	697.995	612.531	481.962	155.520	13.076	14.808	18.526	0.272	0.307
200	400	50	-30	155.520	1103.529	946.749	707.231	155.520	8.384	9.739	12.913	0.175	0.203
350	400	50	-2	194.400	668.453	602.405	501.164	194.400	16.704	18.401	21.756	0.345	0.379
350	400	5	-2	194.400	322.800	314.150	300.892	194.400	31.615	32.301	33.405	0.629	0.641
350	800	2	-2	298.080	434.369	432.896	430.255	298.080	34.801	34.891	35.054	0.685	0.686
600	800	2	-2	362.880	518.945	517.968	516.191	362.880	35.242	35.292	35.384	0.692	0.693
800	900	2	-2	440.640	624.365	623.790	622.682	440.640	35.440	35.465	35.512	0.696	0.696
800	900	25	-60	440.640	834.697	822.762	799.804	440.640	28.087	28.428	29.107	0.565	0.571
800	900	2	-60	440.640	769.753	761.321	745.102	440.640	30.042	30.314	30.850	0.601	0.606

- Situação h)

Tabela D-8 - Movimento Transversal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação h)

Vão	Vão	hAB	hBC	$F_{v_{cond}}$	VB			$\Theta$			$\Delta x$		
AB	BC	[m]	[m]	$+ F_{v_{isol}}$	[daN]			[°]			[m]		
[m]	[m]			[daN]	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	130	-5	5	64.800	-161.354	-101.287	9.947	-25.108	-37.380	77.645	-0.509	-0.729	1.172
120	140	-5	5	67.392	-148.552	-90.889	14.766	-27.873	-41.609	74.600	-0.561	-0.797	1.157
130	140	-5	5	69.984	-134.510	-79.475	20.629	-31.251	-46.705	71.147	-0.623	-0.873	1.136
200	250	-5	5	116.640	28.505	57.530	104.117	74.526	62.992	48.540	1.157	1.069	0.899
200	225	-5	5	110.160	11.539	42.881	93.956	81.557	67.526	49.771	1.187	1.109	0.916
200	925	-5	5	291.600	337.174	340.968	348.232	41.122	40.810	40.224	0.789	0.784	0.775
250	925	-5	5	304.560	366.432	369.707	375.944	40.005	39.758	39.295	0.771	0.767	0.760
250	925	-10	5	304.560	320.963	326.813	337.950	43.710	43.203	42.263	0.829	0.821	0.807
200	925	-10	10	291.600	268.263	275.846	290.366	47.528	46.749	45.311	0.885	0.874	0.853
500	500	-5	5	259.200	310.702	316.934	326.971	40.154	39.605	38.746	0.774	0.765	0.751
500	600	-5	10	285.120	331.758	338.779	350.453	40.953	40.370	39.431	0.787	0.777	0.762
600	600	-10	10	311.040	352.898	360.644	373.847	41.635	41.029	40.027	0.797	0.788	0.772
700	700	-14	14	362.880	412.028	419.108	431.838	41.580	41.103	40.267	0.796	0.789	0.776
800	800	-14	20	414.720	480.661	486.531	497.584	40.978	40.638	40.011	0.787	0.782	0.772
800	800	-18	20	414.720	469.257	475.819	488.171	41.652	41.262	40.544	0.798	0.791	0.780

## Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores em Suspensão

- Situação a)

Tabela D-9 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação a)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
120	130	0	5	8.571	-7.969	19.234	60.085	11.886	8.571	3.550	11.824	8.571	3.723	1.187	0	0.590
130	132	0	5	8.592	-2.054	24.468	64.021	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.681	0	0.124
140	142	0	5	8.630	12.132	36.337	72.050	11.827	8.630	3.908	11.814	8.630	3.940	-0.185	0	0.106
160	162	0	5	8.708	37.943	58.343	87.940	11.782	8.708	4.244	11.768	8.708	4.273	-0.081	0	0.081
160	162	0	8	8.708	-9.005	23.626	70.970	11.782	8.708	4.244	11.768	8.708	4.273	0.846	0	0.099
200	205	0	8	8.870	48.092	71.648	105.201	11.690	8.870	4.849	11.653	8.870	4.911	-0.173	0	0.144
202	205	0	8	8.874	48.835	72.339	105.810	11.680	8.874	4.876	11.658	8.874	4.913	-0.103	0	0.086
210	205	0	8	8.889	51.812	75.097	108.230	11.640	8.889	4.980	11.677	8.889	4.919	0.162	0	-0.137
300	305	0	5	8.488	181.555	188.440	198.149	10.453	8.488	5.721	10.418	8.488	5.762	-0.048	0	0.052
300	305	0	10	8.488	144.716	158.482	177.899	10.453	8.488	5.721	10.418	8.488	5.762	-0.060	0	0.058
300	305	0	30	8.488	-2.351	38.891	97.061	10.453	8.488	5.721	10.418	8.488	5.762	-1.080	0	0.103
300	313	0	10	8.454	150.002	163.137	181.697	10.408	8.454	5.705	10.318	8.454	5.810	-0.148	0	0.143
500	560	0	20	7.452	320.677	325.471	333.925	8.149	7.452	6.255	8.018	7.452	6.433	-0.103	0	0.134
560	500	0	20	7.452	313.213	318.578	328.039	8.018	7.452	6.433	8.149	7.452	6.255	0.106	0	-0.137

600	725	0	30	7.234	410.824	414.138	420.578	7.693	7.234	6.378	7.553	7.234	6.599	-0.087	0	0.133
800	1200	0	10	7.007	696.674	697.177	698.279	7.247	7.007	6.511	7.115	7.007	6.766	-0.049	0	0.093

- Situação b)

Tabela D-10 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação b)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
130	132	2	5	8.592	37.203	52.951	76.436	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.075	0	0.105
130	132	8	5	8.592	154.881	138.332	113.652	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.020	0	0.073
130	132	2	8	8.592	-20.721	10.924	58.118	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	0.218	0	0.135
180	185	5	8	8.792	92.727	102.488	116.481	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.094	0	0.141
180	185	12	8	8.792	190.840	176.070	154.898	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.047	0	0.108
180	185	30	20	8.792	278.283	241.652	189.143	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.033	0	0.089
250	260	10	12	8.930	169.066	172.285	176.837	11.396	8.930	5.445	11.323	8.930	5.547	-0.107	0	0.143
250	260	13	10	8.930	217.210	210.129	200.122	11.396	8.930	5.445	11.323	8.930	5.547	-0.084	0	0.127
300	313	15	20	8.454	153.164	165.718	183.457	10.408	8.454	5.705	10.318	8.454	5.810	-0.145	0	0.142
300	313	20	15	8.454	263.060	255.367	244.498	10.407	8.454	5.705	10.318	8.454	5.810	-0.086	0	0.108
500	560	20	15	7.452	405.617	403.847	400.726	8.149	7.452	6.255	8.018	7.452	6.433	-0.082	0	0.112
500	560	15	20	7.452	372.770	373.538	374.895	8.149	7.452	6.255	8.018	7.452	6.433	-0.089	0	0.120
600	725	20	15	7.234	499.021	498.012	496.053	7.693	7.234	6.378	7.553	7.234	6.599	-0.071	0	0.113

600	725	15	40	7.234	429.187	431.605	436.305	7.693	7.234	6.378	7.553	7.234	6.599	-0.083	0	0.129
600	725	15	20	7.234	474.161	474.371	474.780	7.693	7.234	6.378	7.553	7.234	6.599	-0.075	0	0.118
550	620	15	20	7.347	414.000	414.537	415.529	7.910	7.347	6.335	7.797	7.347	6.501	-0.070	0	0.101
620	550	15	20	7.347	401.829	403.134	405.539	7.797	7.347	6.501	7.910	7.347	6.335	0.072	0	-0.104
620	880	50	60	7.178	521.930	521.563	520.834	7.600	7.178	6.380	7.436	7.178	6.650	-0.080	0	0.132
130	132	2	5	8.592	37.203	52.951	76.436	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.075	0	0.105

- Situação c)

Tabela D-11 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação c)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
130	132	5	0	8.592	192.704	165.774	125.613	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.016	0	0.066
130	132	30	0	8.593	678.347	518.149	279.255	11.849	8.593	3.730	11.836	8.593	3.764	-0.005	0	0.030
130	140	30	0	8.609	680.780	521.850	286.005	11.867	8.609	3.735	11.803	8.609	3.901	-0.024	0	0.145
180	185	10	0	8.792	272.020	236.953	186.683	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.033	0	0.090
185	180	10	0	8.792	268.232	234.111	185.197	11.705	8.792	4.626	11.741	8.792	4.558	0.034	0	-0.091
195	180	10	0	8.813	264.698	232.708	186.946	11.657	8.813	4.764	11.766	8.813	4.566	0.103	0	-0.259
180	190	10	0	8.803	273.745	238.882	188.960	11.753	8.803	4.562	11.681	8.803	4.695	-0.067	0	0.175
250	265	15	0	8.902	331.945	300.907	257.093	11.361	8.902	5.433	11.251	8.902	5.585	-0.084	0	0.147
250	265	30	0	8.902	477.430	415.477	328.024	11.360	8.902	5.433	11.250	8.902	5.584	-0.059	0	0.116

300	330	30	0	8.380	446.718	407.604	352.071	10.308	8.380	5.672	10.106	8.380	5.905	-0.115	0	0.166
300	315	10	0	8.445	296.261	282.631	263.365	10.396	8.445	5.702	10.293	8.445	5.822	-0.088	0	0.115
315	300	5	0	8.445	292.724	279.743	261.392	10.293	8.445	5.822	10.396	8.445	5.702	0.089	0	-0.116
500	570	5	0	7.439	403.576	402.267	399.947	8.133	7.439	6.247	7.985	7.439	6.450	-0.094	0	0.129
600	735	5	0	7.227	495.524	494.871	493.599	7.684	7.227	6.373	7.537	7.227	6.608	-0.076	0	0.121
600	750	30	0	7.216	568.616	564.824	557.393	7.672	7.216	6.365	7.513	7.216	6.620	-0.071	0	0.116
750	600	5	0	7.216	498.172	497.665	496.672	7.513	7.216	6.620	7.672	7.216	6.366	0.081	0	-0.130
800	625	20	0	7.184	545.586	543.874	540.465	7.442	7.184	6.654	7.634	7.184	6.342	0.090	0	-0.147
625	800	30	0	7.184	585.930	582.518	575.723	7.633	7.184	6.342	7.442	7.184	6.654	-0.084	0	0.138
700	1100	25	0	7.038	705.009	703.708	700.908	7.354	7.038	6.412	7.168	7.038	6.752	-0.068	0	0.124

- Situação d)

Tabela D-12 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação d)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
130	132	0	-5	8.592	191.218	164.696	125.143	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.017	0	0.066
130	132	0	-20	8.592	479.753	374.042	216.389	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.007	0	0.039
130	120	0	-30	8.572	722.344	547.335	284.594	11.825	8.572	3.723	11.887	8.572	3.550	0.022	0	-0.153
180	185	0	-5	8.792	200.024	182.957	158.491	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.045	0	0.106
185	180	0	-5	8.792	201.920	184.379	159.234	11.705	8.792	4.626	11.741	8.792	4.558	0.045	0	-0.105

300	330	0	-30	8.381	426.869	391.272	340.732	10.310	8.381	5.673	10.107	8.381	5.905	-0.120	0	0.172
330	300	0	-30	8.380	446.718	407.604	352.071	10.106	8.380	5.905	10.308	8.380	5.672	0.115	0	-0.166
400	430	0	-5	7.807	321.861	319.165	314.949	8.950	7.807	6.048	8.824	7.807	6.195	-0.099	0	0.117
600	735	0	-10	7.227	493.012	492.478	491.438	7.684	7.227	6.373	7.537	7.227	6.608	-0.076	0	0.122
735	600	0	-10	7.227	495.524	494.871	493.599	7.537	7.227	6.608	7.684	7.227	6.373	0.076	0	-0.121
800	1200	0	-5	7.007	728.332	728.206	727.930	7.247	7.007	6.511	7.115	7.007	6.766	-0.047	0	0.090

- Situação e)

Tabela D-13 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação e)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
130	132	-5	0	8.592	-3.540	23.390	63.551	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.890	0	0.124
140	143	-5	0	8.632	11.221	35.748	71.917	11.829	8.632	3.909	11.810	8.632	3.957	-0.287	0	0.158
180	183	-5	0	8.788	60.873	78.453	103.666	11.736	8.788	4.557	11.714	8.788	4.597	-0.083	0	0.095
183	180	-5	0	8.788	62.023	79.316	104.116	11.714	8.788	4.597	11.736	8.788	4.557	0.082	0	-0.095
300	313	-5	0	8.454	184.097	190.950	200.632	10.408	8.454	5.705	10.318	8.454	5.810	-0.122	0	0.130
300	310	-5	0	8.466	182.913	189.821	199.574	10.425	8.466	5.711	10.355	8.466	5.792	-0.095	0	0.102
313	300	-5	0	8.454	185.643	192.211	201.492	10.318	8.454	5.810	10.408	8.454	5.705	0.121	0	-0.130
313	300	-10	0	8.454	150.002	163.137	181.697	10.318	8.454	5.810	10.408	8.454	5.705	0.148	0	-0.143
500	560	-10	0	7.452	347.929	350.612	355.344	8.149	7.452	6.255	8.018	7.452	6.433	-0.095	0	0.126



560	500	-10	0	7.452	351.664	354.061	358.289	8.018	7.452	6.433	8.149	7.452	6.255	0.094	0	-0.125
700	950	-10	0	7.090	573.246	573.924	575.340	7.412	7.090	6.452	7.267	7.090	6.710	-0.065	0	0.115
950	700	-2	0	7.090	592.360	592.460	592.670	7.267	7.090	6.710	7.412	7.090	6.452	0.063	0	-0.111

- Situação f)

Tabela D-14 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação f)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
130	132	-2	-5	8.592	151.961	136.213	112.728	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.021	0	0.073
130	132	-8	-5	8.592	34.283	50.832	75.512	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.081	0	0.106
130	132	-2	-10	8.592	248.458	206.227	143.244	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.013	0	0.058
180	200	-5	-15	8.824	256.074	226.829	185.034	11.779	8.824	4.570	11.634	8.824	4.832	-0.142	0	0.340
180	185	-2	-8	8.792	212.893	192.608	163.529	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.042	0	0.102
180	187	-2	-10	8.796	239.407	212.729	174.501	11.746	8.796	4.560	11.695	8.796	4.654	-0.053	0	0.134
250	260	-5	-10	8.930	229.269	219.607	205.949	11.396	8.930	5.445	11.323	8.930	5.547	-0.080	0	0.124
250	260	-10	-30	8.930	368.003	328.657	273.037	11.397	8.930	5.445	11.324	8.930	5.547	-0.050	0	0.094
260	250	-5	-10	8.930	234.915	224.047	208.684	11.323	8.930	5.547	11.396	8.930	5.445	0.078	0	-0.122
300	313	-10	-20	8.454	289.422	276.868	259.129	10.408	8.454	5.705	10.318	8.454	5.810	-0.079	0	0.102
500	560	-20	-22	7.452	381.389	381.483	381.646	8.149	7.452	6.255	8.018	7.452	6.433	-0.087	0	0.118
600	500	-20	-22	7.402	415.407	414.116	411.795	7.891	7.402	6.497	8.088	7.402	6.224	0.120	0	-0.167

600	725	-20	-22	7.234	473.378	473.614	474.070	7.693	7.234	6.378	7.553	7.234	6.599	-0.075	0	0.119
600	740	-20	-40	7.223	517.331	515.720	512.571	7.680	7.223	6.370	7.529	7.223	6.612	-0.075	0	0.120
800	1100	-10	-30	7.031	708.443	707.922	706.797	7.273	7.031	6.531	7.160	7.031	6.746	-0.041	0	0.078

- Situação g)

Tabela D-15 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação g)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
130	132	5	-5	8.592	289.339	235.888	156.174	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	-0.011	0	0.054
130	135	5	-5	8.598	288.222	235.509	157.035	11.855	8.598	3.732	11.823	8.598	3.815	-0.028	0	0.132
130	135	5	-20	8.598	570.330	440.384	246.928	11.855	8.598	3.732	11.823	8.598	3.815	-0.014	0	0.085
130	135	20	-5	8.598	581.068	448.195	250.395	11.855	8.598	3.732	11.823	8.598	3.815	-0.014	0	0.084
130	135	20	-20	8.598	863.177	653.068	340.281	11.855	8.598	3.732	11.823	8.598	3.815	-0.009	0	0.062
350	370	10	-20	8.083	429.269	403.651	365.932	9.581	8.083	5.900	9.468	8.083	6.025	-0.067	0	0.087
350	400	20	-20	7.988	485.225	454.901	409.451	9.452	7.988	5.853	9.190	7.988	6.146	-0.137	0	0.180
350	400	50	-50	7.987	805.553	729.954	616.639	9.452	7.987	5.853	9.190	7.987	6.146	-0.083	0	0.121
400	350	50	-50	7.987	805.553	729.954	616.639	9.190	7.987	6.146	9.452	7.987	5.853	0.083	0	-0.121
600	730	5	-5	7.230	504.897	503.694	501.353	7.688	7.230	6.375	7.545	7.230	6.604	-0.073	0	0.116
600	800	40	-60	7.184	733.203	723.523	704.241	7.634	7.184	6.342	7.442	7.184	6.655	-0.067	0	0.113
800	1300	40	-60	6.986	903.734	901.239	895.712	7.224	6.986	6.495	7.078	6.986	6.781	-0.042	0	0.082

- Situação h)

Tabela D-16 - Movimento Longitudinal da cadeia de isoladores em suspensão num cantão em declive com um apoio em suspensão, Situação h)

Vão AB [m]	Vão BC [m]	hAb [m]	hBC [m]	$t_m$ a 20° [daN/mm <sup>2</sup> ]	VB [daN]			Tração Vão AB [daN/mm <sup>2</sup> ]			Tração Vão BC [daN/mm <sup>2</sup> ]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
130	132	-5	5	8.592	-100.175	-46.724	32.990	11.848	8.592	3.730	11.836	8.592	3.764	0.035	0	0.219
150	155	-5	5	8.675	-56.569	-12.474	51.910	11.812	8.675	4.081	11.778	8.675	4.158	0.172	0	0.328
180	185	-5	5	8.792	-6.648	27.959	77.570	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	1.196	0	0.206
180	185	-2	5	8.792	35.442	59.525	94.050	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.221	0	0.172
180	185	-5	2	8.792	34.304	58.672	93.604	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.227	0	0.173
180	185	-2	2	8.792	76.394	90.238	110.085	11.741	8.792	4.558	11.705	8.792	4.626	-0.112	0	0.149
350	370	-5	5	8.083	202.924	211.545	224.239	9.581	8.083	5.900	9.468	8.083	6.025	-0.139	0	0.140
350	360	-5	5	8.114	198.100	207.089	220.255	9.623	8.114	5.915	9.566	8.114	5.980	-0.073	0	0.073
360	350	-5	5	8.114	198.100	207.089	220.255	9.566	8.114	5.980	9.623	8.114	5.915	0.073	0	-0.073
500	550	-5	5	7.464	345.786	348.412	353.018	8.165	7.464	6.263	8.053	7.464	6.415	-0.082	0	0.108
600	725	-5	5	7.234	453.456	454.675	457.044	7.693	7.234	6.378	7.553	7.234	6.599	-0.079	0	0.123
800	1100	-10	10	7.031	619.512	621.022	624.286	7.273	7.031	6.531	7.160	7.031	6.746	-0.047	0	0.088

## Anexo E

### Movimento das Cadeias de Isoladores nas Situações de Cantão em Ângulo

Tabela E-1 - Movimento das cadeias de isoladores em suspensão num cantão com um apoio em suspensão e com estrutura em ângulo.

Vão AB [m]	Vão BC [m]	$\beta$ [°]	$F_v$ [daN]	$\alpha_{ext}$ [°]	$F_R$ [daN]			$\lambda$ [°]			$\Delta_x$ [m]		
					-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C	-5°C	20°C	80°C
300	400	11.459	189.440	-95.730	673.620	581.065	489.481	-106.740	-95.730	-76.892	1.120	1.096	1.061
120	140	11.459	75.392	-95.730	701.354	552.253	287.836	-96.941	-95.730	-81.206	1.188	1.181	1.134
120	140	2.865	75.392	-91.432	232.565	194.794	145.626	-95.104	-91.432	-61.564	1.103	1.068	0.990
120	140	22.918	75.392	-101.459	1320.831	1024.349	485.092	-102.093	-101.459	-93.031	1.197	1.194	1.175

120	140	51.566	75.392	-115.783	2802.004	2153.033	963.134	-116.057	-115.783	-111.894	1.199	1.199	1.194
140	120	51.566	75.392	-115.783	2802.004	2153.033	963.134	-115.509	-115.783	-119.672	1.199	1.199	1.194
140	120	22.918	75.392	-101.459	1320.831	1024.349	485.092	-100.826	-101.459	-109.887	1.197	1.194	1.175
140	120	2.865	75.392	-91.432	232.565	194.794	145.626	-87.761	-91.432	-121.301	1.103	1.068	0.990
200	225	2.865	118.160	-91.432	269.843	235.227	193.456	-97.242	-91.432	-70.743	1.033	0.993	0.926
200	225	11.459	118.160	-95.730	718.924	585.696	375.265	-97.897	-95.730	-85.285	1.172	1.158	1.104
200	225	28.648	118.160	-104.324	1605.898	1276.792	742.860	-105.269	-104.324	-99.208	1.194	1.191	1.173
225	200	28.648	118.160	-104.324	1605.898	1276.792	742.860	-103.379	-104.324	-109.440	1.194	1.191	1.173
225	280	28.648	138.896	-104.324	1589.966	1284.665	814.565	-106.610	-104.324	-95.282	1.192	1.187	1.169
225	280	11.459	138.896	-95.730	726.852	601.241	428.142	-100.871	-95.730	-77.848	1.162	1.145	1.098
225	280	2.865	138.896	-91.432	292.791	254.663	244.826	-104.349	-91.432	-58.783	1.009	0.965	0.951
225	350	2.865	157.040	-91.432	336.411	271.374	352.394	-118.453	-91.432	-41.553	1.013	0.943	1.026
225	1000	2.865	325.520	-91.432	693.156	432.470	856.304	-140.933	-91.432	-29.622	1.008	0.833	1.063
270	1000	2.865	337.184	-91.432	655.217	444.185	771.628	-136.795	-91.432	-34.310	0.979	0.829	1.028
400	400	0.573	215.360	-90.286	241.978	237.778	231.308	-90.286	-90.286	-90.286	0.761	0.753	0.741
400	400	1.719	215.360	-90.859	295.212	282.613	263.203	-90.859	-90.859	-90.859	0.849	0.830	0.799
400	400	5.730	215.360	-92.865	481.432	439.451	374.775	-92.865	-92.865	-92.865	1.023	0.997	0.943
400	400	11.459	215.360	-95.730	746.839	662.981	533.791	-95.730	-95.730	-95.730	1.116	1.096	1.050
400	400	28.648	215.360	-104.324	1532.454	1324.640	1004.485	-104.324	-104.324	-104.324	1.178	1.171	1.151
400	400	45.837	215.360	-112.918	2288.489	1961.387	1457.456	-112.918	-112.918	-112.918	1.190	1.187	1.176
400	1200	5.730	422.720	-92.865	733.772	635.574	754.694	-119.111	-92.865	-55.439	0.939	0.884	0.949
400	1200	1.146	422.720	-90.573	571.212	465.308	648.601	-125.238	-90.573	-45.501	0.839	0.748	0.892
400	1200	11.459	422.720	-95.730	949.652	847.895	900.110	-115.632	-95.730	-65.223	1.022	0.988	1.007

400	300	11.459	189.440	-95.730	747.046	640.606	522.409	-86.524	-95.730	-115.346	1.134	1.113	1.075
400	300	5.730	189.440	-92.865	479.038	415.305	383.721	-78.363	-92.865	-120.174	1.056	1.019	0.995
600	800	5.730	370.880	-92.865	611.326	586.717	568.230	-101.095	-92.865	-80.135	0.920	0.905	0.892
600	800	2.865	370.880	-91.432	495.790	478.832	479.276	-101.608	-91.432	-76.274	0.835	0.820	0.821
600	800	11.459	370.880	-95.730	843.115	802.015	747.667	-101.665	-95.730	-86.126	1.026	1.012	0.990
600	1200	11.459	474.560	-95.730	941.277	899.944	882.943	-105.280	-95.730	-79.806	0.985	0.970	0.963
600	1200	5.730	474.560	-92.865	718.977	687.518	705.287	-105.458	-92.865	-72.697	0.887	0.868	0.879
700	1200	5.730	500.480	-92.865	732.912	713.411	712.903	-101.251	-92.865	-78.763	0.873	0.861	0.861
800	800	5.730	422.720	-92.865	651.342	637.573	611.664	-92.865	-92.865	-92.865	0.894	0.885	0.868
800	800	4.584	422.720	-92.292	605.645	594.628	573.898	-92.292	-92.292	-92.292	0.864	0.856	0.841
900	900	5.157	474.560	-92.578	676.980	667.088	647.758	-92.578	-92.578	-92.578	0.862	0.856	0.843
1000	1000	5.730	526.400	-92.865	748.544	739.589	721.548	-92.865	-92.865	-92.865	0.860	0.855	0.845
1100	1110	6.303	578.240	-93.151	820.295	812.126	795.254	-93.151	-93.151	-93.151	0.857	0.853	0.844

## Anexo F

# Correspondência de Variáveis do Word para MatLab

Tabela F-1 - Correspondencia de variáveis entre Word e Matlab

Word	MatLab
<b>Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores num Cantão em Patamar</b>	
Vão AB	v1
Vão BC	v2
Le	veq
Lcr	vc
$F_{v_{cond}}$	fvcond
$F_{v_{isol}}$	fviso
Pc	pcond
Pi	pis
$F_{v_{cond}} + F_{v_{isol}}$	H
Pc+Pi	V
$\theta$	tetat
$\Delta x$	desviot
Distancia	distt
<b>Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores num Cantão em Patamar</b>	
$F_{v1}$ e $F_{v2}$	fv1 e fv2
$t_m$	trmon tr_temp_veq
$t_{mAB}$	tracao1 e tr_temp_v1
$t_{mBC}$	tracao2 e tr_temp_v2
$t_{res}$	tr_temp_res
$\theta$	teta

---

$\Delta x$	desvio
<b>Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores num Cantão em Declive</b>	
$h_{AB}$	$h_1$
$h_{BC}$	$h_2$
$t_m$	tracao_d_eq e tr_d_temp_veq
$F_{v_{cond}} + F_{v_{isol}}$	H e H_d_dt
$P_c + P_i$	V e V_d_dt
VB	VB e VB_v
$\theta$	tetat e tetat_d_dt
$\Delta x$	desviot e desvio_t_dt
Distancia	distt e distt_d_dt
<b>Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores num Cantão em Declive</b>	
$t_m$	trmon e tr_temp_d_veq
Tração Vão AB	tracao1 e tr_temp_v1_d
Tração Vão BC	tracao2 e tr_temp_v2_d
VB	VB e VB_v
$\theta$	teta_d_dl
$\Delta x$	desvio_d_dl
<b>Desvio Longitudinal da Cadeia de Isoladores num Cantão com Estrutura em ângulo</b>	
$\beta$	beta
$F_v$	fv_v
$\alpha_{ext}$	fv_ang
$F_R$	fr_temp_tot
$\lambda$	fr_temp_tot_ang
$\theta$	desvio_ang
$\Delta x$	desl_ang
Distancia	dist_ang

---